

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Tehnoekonomska analiza proizvodnje
biciklističkih dijelova od kompozitnih tvorevina**

Završni rad

Martin Dušak, univ.spec.tran

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

**Tehnoekonomska analiza proizvodnje
biciklističkih dijelova od kompozitnih tvorevina**

Završni rad

Mentor:

Prof. dr. sc. Mladen Šercer

Student:

Martin Dušak, univ.spec.tran

Zagreb, 2014.

PODACI ZA BIBLIOGRAFSKU KARTICU:

UDK:

Ključne riječi:	Kompozitne tvorevine, biciklistički okvir, injekcijsko prešanje smola (RTM), proizvodnja u autoklavu, troškovi
Znanstveno područje:	Tehničke znanosti
Znanstveno polje:	Strojarstvo
Institucija u kojoj je rad izrađen:	Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje
Mentor rada:	Prof. dr. sc. Mladen Šercer, red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu
Broj stranica:	74
Broj slika:	31
Broj tablica:	15
Broj korištenih bibliografskih jedinica:	20
Datum obrane:	
Povjerenstvo:	Dr. sc. Nedeljko Štefanić, red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu – predsjednik povjerenstva Dr. sc. Mladen Šercer, red. prof. Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu – voditelj završnog rada Dr. sc. Pero Raos, red. prof. Strojarskog fakulteta u Slavonskom Brodu – član povjerenstva
Institucija u kojoj je rad pohranjen:	Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb



Zagreb, 11.01.2014.

Zadatak za završni rad

Kandidat: *Martin Dušak, mr.spec.tran.*

Naslov zadatka: **Tehnoekonomska analiza proizvodnje biciklističkih dijelova od kompozitnih tvorevina**

Sadržaj zadatka:

Proizvodi od kompozita se najčešće upotrebljavaju u građevinarstvu, proizvodnji vozila, sportskih rekvizita i ortopedskih pomagala. Upotreba kompozitnih tvorevina u proizvodnji biciklističkih dijelova je u porastu zbog mogućnosti smanjenja težine konstrukcije, fleksibilnosti pri konstruiranju i korozivnoj otpornosti. Upotrebom kompozita postiže se fleksibilno konstruiranje i veća je mogućnost oblikovanja svojstava materijala primjenjenih u specifičnoj konstrukciji.

U radu je potrebno:

1. Generirati model konstrukcije biciklističkog okvira.
2. Provesti statički proračun čvrstoće metodom konačnih elemenata.
3. Na osnovu utvrđenih naprezanja dijelova biciklističkog okvira potrebno je definirati strukturu ojačala.
4. Analizirati mogućnosti primjene sendvič kompozita u proizvodnji biciklističkih dijelova
5. Opisati značajke proizvodnje kompozita postupkom injekcijskog prešanja te postupkom u autoklavu.
6. Tehnoekonomskom analizom utvrditi troškove proizvodnje injekcijskim prešanjem i postupkom u autoklavu.

Zadatak zadan: *18.02.2014.*

Rad predan:

Mentor:

Mladen Šercer
Dr.sc. Mladen Šercer,
red.prof.

Predsjednik Odbora za
poslijediplomske studije:

Dubravko Majetić
Dr.sc. Dubravko Majetić,
red.prof.

Voditelj smjera:

Nedeljko Štefanić
Dr.sc. Nedeljko Štefanić,
red.prof.

Zahvala

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Mladenu Šerceru na pomoći pri oblikovanju i definiranju teme završnog rada, te na pruženoj pomoći i savjetima pri oblikovanju završnog teksta rada.

Zahvaljujem se demonstratorima iz predmeta Metoda konačnih elemenata koji su mi pomogli pri učenju osnova Metode konačnih elemenata u softveru Abaqus, te na savjetima pri provođenju FEM analize.

Zahvaljujem prof. dr. sc. Borisu Ljubenkovu na pruženoj literaturi o tehnoekonomskim analizama iz područja brodogradnje, te na savjetima pri provođenju tehnoekonomskih analiza proizvodnje.

Zahvaljujem poduzeću Motoplastika d.o.o. na pomoći pri definiranju materijala i kalupa korištenih u proizvodnji polimernih kompozita.

Sadržaj

Predgovor	VIII
Sažetak	IX
Summary	X
Popis oznaka	XII
Popis slika	XIV
Popis tablica	XVI
1. Uvod	1
2. Primjena kompozitnih tvorevina u biciklističkoj industriji	2
3. Značajke materijala korištenih u proizvodnji biciklističkih dijelova	6
3.1. Značajke duromernih matrica	9
3.2. Značajke ojačala	12
3.3. Prepreg materijali	16
4. Modeliranje geometrije biciklističkog okvira	18
4.1. Modeliranje biciklističkog okvira	18
4.2. Određivanje debljine stijenke metodom konačnih elemenata	21
4.3. Teorijsko određivanje strukture i mase biciklističkog okvira	28
4.4. Proizvodna struktura biciklističkog okvira	30
4.5. Mogućnosti upotrebe sendvič kompozita u proizvodnji biciklističkih dijelova	32
5. Postupci proizvodnje kompozitnih tvorevina	37
5.1. Proizvodnja u autoklavu	37
5.1.1. Proizvodni ciklus	38
5.1.2. Primjer proizvodnje laminata	40
5.1.3. Modeliranje svojstava matrice	41

5.1.4. Postupci kontrole umreživanja i proizvodnje kompozita u autoklavu	42
5.1.5. Definicija kalupa i materijala korištenih u proizvodnji biciklističkih dijelova postupkom u autoklavu	43
5.2. Injekcijsko prešanje smola (resin transfer molding)	46
5.2.1. Predoblikovanje vlakana ojačala	47
5.2.2. Ubrizgavanje smole	48
5.2.3. Greške pri ubrizgavanju	51
5.2.4. Umreživanje smole	51
5.2.5. Greške pri umreživanju	52
5.2.6. Modeliranje proizvodnih procesa	52
5.2.7. Proizvodnja kalupa	57
5.2.8. Definicija kalupa i materijala korištenih u proizvodnji biciklističkih dijelova RTM postupkom	58
6. Određivanje troškova proizvodnje	60
6.1. Pravila upravljanja troškovima	61
6.2. Modeli upravljanja troškovima	61
6.3. Analiza troškova proizvodnje biciklističkog okvira postupkom u autoklavu	63
6.4. Analiza troškova proizvodnje biciklističkog okvira RTM postupkom	66
6.5. Tehnoekonomska analiza	69
7. Zaključak	71
8. Literatura	72
Životopis	73
Biography	74

Predgovor

Proizvodi od kompozitnih tvorevina imaju raširenu primjenu jer je njihovom upotrebom moguće smanjiti masu konstrukcije, te poboljšati korozijsku postojanost konstrukcija proizvedenih od kompozitnih tvorevina. U ovom radu je bio cilj analizirati dvije tehnologije proizvodnje kompozita, koje se najčešće koriste, a to su su injekcijsko prešanje smola (RTM postupak), te proizvodnja u autoklavu. Kao proizvod koji će se analizirati izabran je biciklistički okvir, jer su u toj proizvodnji kompoziti uspješno zamijenili metalne materijale. Upotrebom kompozita postiže se fleksibilno konstruiranje i veća je mogućnost oblikovanja svojstava materijala primjenjenih u specifičnoj konstrukciji.

Opisane su karakteristike proizvodnih tehnologija, te karakteristike materijala i opreme koju je potrebno koristiti pri proizvodnji. U radu se ukazalo na parametre proizvodnih procesa, te na probleme koji mogu nastati pri planiranju proizvodnih ciklusa.

U radu su definirali uzroci pojedinih proizvodnih troškova, te su opisani načini na koje se upravlja troškovima u proizvodnji. Definirani su modeli upravljanja troškovima, na temelju kojih su određeni troškovi proizvodnje biciklističkog okvira.

Sažetak

U radu je obrađena tehnoeekonomska analiza proizvodnje biciklističkog okvira na osnovu tehničke dokumentacije, koja je izrađena na temelju definicija osnovnih dimenzija biciklističkog okvira tvrtke Cannondale. Navedeni proizvod je izabran kao tema završnog rada, jer omogućuje izradu plana proizvodnje koristeći tehnologije koje se najčešće primjenjuju u proizvodnji kompozitnih tvorevina.

Kao tehnologije kojima je najpogodnije izraditi biciklistički okvir od kompozitnih materijala, izabrane su injekcijsko prešanje smola (RTM postupak), te proizvodnja u autoklavu. Objašnjene su karakteristike tih tehnologija, i opisane su karakteristike materijala i opreme koju je potrebno koristiti pri proizvodnji.

Biciklistički okvir se konstruirao u računalnom paketu *Rhino*, te se izveo statički proračun čvrstoće metodom konačnih elemenata. U radu su definirani uzroci pojedinih proizvodnih troškova, te su opisani načini na koje se upravlja troškovima u proizvodnji.

Usporedbom proizvodnje u autoklavu i RTM postupka zaključuje se da je proizvodnja RTM postupkom kompliciranija, potrebno je raditi s tekućom smolom i prethodno pripremati slojeve ojačala i kalupe. RTM postupak ima veći godišnji trošak proizvodnje, jer je potrebno više proizvodnih operacija u pripremi slojeva i kalupa. Proizvodnja u autoklavu ubrzava proces pripreme slojeva ojačala, te osigurava proizvode identičnih mehanička svojstva. Proizvodnja u autoklavu je pouzdanija i manja je vjerojatnost nastajanja škarta.

Summary

This paper deals with the techno-economic analysis of the production of bicycle frame on the basis of technical documentation, which was based on the definition of the basic dimensions of bike frames from Cannondale company. The product of bicycle frame has been chosen as the theme of the final paper, because it enables the creation of production schedules using technologies that are commonly used in the manufacture of composite formation.

As a technologies which are best suited to manufacture bicycle frame made of composite materials, were selected resin transfer molding (RTM process), and production in an autoclave. There are explained the characteristics of these technologies, and described the characteristics of the materials and equipment which are used in production.

Bicycle frame is constructed in a computer package Rhino, and there is performed static strength calculation by finite element method. The paper defines the causes of certain production costs, and describes ways in which to manage the cost of production.

A comparison of production in an autoclave and RTM process is revealed that the production using the RTM process is more complicated, it is necessary to work with liquid resin and a previously prepared layers of fibers and molds. RTM process has a higher annual cost of production, because it takes more production operations in preparation of layers and molds. Production in the autoclave accelerates the process of preparing layers of fibers, and provides products with identical mechanical properties. Production in the autoclave is more reliable and there is less probability of appearance scrap.

Ključne riječi:

- Kompozitne tvorevine
- Biciklistički okvir
- Injekcijsko prešanje smola (RTM)
- Proizvodnja u autoklavu
- Troškovi

Key words:

- Composite formations
- Bicycle frame
- Resin transfer molding
- Production in the autoclave
- Costs

Popis oznaka

A - frekvencijski faktor,

α – stupanj umreživanja

α_g - stupanj umreživanja do faze želiranja

A_f - površina vanjskih slojeva sendvič kompozita, mm^2 ,

b - širina nosača, mm

B_p - brutto plaća radnika, kn,

CRS - cijena radnog sata, kn/h,

C_{pg} - cijena prerade godišnje, kn,

D_v - vanjski promjer biciklističkog upravljača, mm,

D_u - unutarnji promjer biciklističkog upravljača, mm,

D_t - broj radnih dana u tjednu

d - udaljenost vanjskih slojeva sendvič kompozita, mm,

E_a - aktivacijska energija, J/mol,

E - modul elastičnosti, N/mm^2 ,

E_c - modul elastičnosti jezgre sendvič kompozita, N/mm^2 ,

E_f - modul elastičnosti vanjskog sloja sendvič kompozita, N/mm^2 ,

F - sila, N,

$f(a)$ - funkcija koja predstavlja količinu umrežene smole

f - funkcionalnost umreživajućih grupa

H - toplotina reakcije umreživanja, J/g,

l - duljina cijevi, cm

L - karakteristična duljina kalupa, m,

I - moment inercije poprečnog presjeka, cm^4

K - permeabilitet, m^2 ,

k - Kozeny-eva konstanta

N_{rsd} - broj radnih sati dnevno,

N_{rsm} - broj radnih sati u mjesecu,

N_{rh} - broj radnih sati u godini,

$N_{hproizvod}$ - radno vrijeme potrebno za izradu jednog proizvoda, h,

M - moment savijanja, Nmm,

m - masa, g,

η_{eff} - efektivna viskoznost, Pas,
 μ - viskoznost smole, Pas,
 P - površina cijevi, cm^2 ,
 P - prosiječni volumni gradijent tlaka smole, Pa/cm,
 p - tlak ubrizgavanja, MPa,
 R - razina reakcije,
 R - radijus vlakna, mm,
 r - molni omjer grupa spojeva u reakciji
 r - radijus cijevi, cm,
 Q - protok smole, cm^3/s ,
 σ - normalna naprezanja, N/mm^2 ,
 Φ - poroznost
 s - udio aaminskog hidrogena u sustavu
 T - temperatura umreživanja, $^{\circ}\text{C}$,
 T_f – vrijeme ispunjavanja površine kalupa, s,
 τ - smična naprezanja, N/mm^2 ,
 t - vrijeme reakcije, min,
 t - debljine stijenke, cm
 t_c - debljina jezgre sendvič kompozita, mm,
 t_f - debljina vanjskih slojeva sendvič kompozita, mm,
 U - pomak, mm,
 u - prosiječni volumni vektor brzine smole, cm^3/s ,
 V - volumen materijala, cm^3 ,
 V_f - udio ojačala,
 z - udaljenost vanjskih slojeva od neutralne osi pri savijanju, mm,
 X - broj proizvoda

Popis slika

Sl. 2.1. Specifična konstrukcija triatlonskog bicikla	2
Sl. 2.2. Proizvodni pogon s autoklavom za proizvodnju kompozitnih tvorevina	3
Sl. 2.3. Biciklistički okvir Cervelo r5ca od 675 grama	5
Sl. 3.1. Usporedba ponašanja pojedinih materijala pri dinamičkim napreznjima	8
Sl. 3.2. Usporedba deformacija duromenih smola	10
Sl. 3.3. Roving od ugljičnih ojačala mase 220g/m^2	13
Sl. 3.4. Odnos vlačnih napreznja i deformacije različitih vrsta ojačala	14
Sl. 3.5. Odnos tlačnih napreznja i deformacije različitih vrsta ojačala	14
Sl. 3.6. Rola prepreg materijala mase 80g/m^2	17
Sl. 4.1. Definicija osnovnih dimenzija biciklističkog okvira, izraženo u cm	18
Sl. 4.2. Osnovne dimenzije konstruiranog biciklističkog okvira	19
Sl. 4.3. 3D prikaz konstruiranog biciklističkog okvira	20
Sl. 4.4. Proračunski model biciklističkog okvira	21
Sl. 4.5. Normalna napreznja od prve skupine opterećenja (L1)	22
Sl. 4.6. Normalna napreznja od druge skupine opterećenja (L2)	23
Sl. 4.7. Smična napreznja od druge skupine opterećenja (L2)	24
Sl. 4.8. Momenti savijanja od druge skupine opterećenja (L2), izraženi oko lokalnih osi 1	25
Sl. 4.9. Momenti savijanja od druge skupine opterećenja (L2), izraženi oko lokalnih osi 2	26
Sl. 4.10. Pomaci konstrukcije od druge skupine opterećenja (L2), izraženi u smjeru osi x	27
Sl. 4.11. Pomaci konstrukcije od druge skupine opterećenja (L2), izraženi u smjeru osi y	27
Sl. 4.12. Podjela dijelova biciklističkog okvira	28
Sl. 4.13. Prikaz biciklističkog upravljača	32
Sl. 4.14. Napreznja u sendvič nosaču	34
Sl. 5.1. Tipično proizvodno pakovanje u autoklavu	38
Sl. 5.2. Proizvodni ciklus u autoklavu	39

Sl. 5.3. Proizvodni ciklus pri proizvodnji kompozita T300/Narmco 5208, (0, +45,-45,90) _{2s}	40
Sl. 5.4. Presjek dijela kalupa za proizvodnju biciklističkih dijelova postupkom u autoklavu	44
Sl. 5.5. Shema RTM postupka	46
Sl. 5.6. Proizvodni ciklus u RTM postupku	47
Sl. 5.7. TTT – dijagram umreživanja	54
Sl. 5.8. Presjek dijela kalupa za proizvodnju biciklističkih dijelova RTM postupkom	59

Popis tablica

Tablica 3.1. Usporedba mehaničkih svojstava metalnih i kompozitnih materijala	7
Tablica 3.2. Usporedba osnovnih značajki epoksi i poliesterske smole	9
Tablica 3.3. Prednosti i nedostaci pojedinih vrsta duromernih smola	10
Tablica 3.4. Osnovna mehanička svojstva pojedinih vrsta ojačala	12
Tablica 4.1. Geometrijske karakteristike dijelova biciklističkog okvira	29
Tablica 4.2. Mase pojedinih dijelova biciklističkog okvira	29
Tablica 4.3. Dimenzije, površina i broj slojeva ugljik-epoksi ojačala (prepreg 200 g/m ²) pri proizvodnji u autoklavu	30
Tablica 4.4. Dimenzije, površina i broj slojeva ugljičnog ojačala (200 g/m ²) pri proizvodnji RTM postupkom	31
Tablica 4.5. Primjer strukture prepreg ojačala za dio 5 okvira, pri proizvodnji u autoklavu	31
Tablica 4.6. Primjer strukture ojačala za dio 5 okvira, pri proizvodnji RTM postupkom	32
Tablica 6.1. Broj i cijena radnih sati za izradu dijelova biciklističkog okvira postupkom u autoklavu	64
Tablica 6.2. Cijena materijala za izradu jednog biciklističkog okvira proizvodnim postupkom u autoklavu	65
Tablica 6.3. Broj i cijena radnih sati za izradu dijelova biciklističkog okvira RTM postupkom	67
Tablica 6.4. Cijena materijala za izradu jednog biciklističkog okvira RTM postupkom proizvodnje	68
Tablica 6.5. Usporedba značajki proizvodnje biciklističkog okvira postupkom u autoklavu i RTM postupkom	69

1. Uvod

Proizvodi od kompozita se najčešće upotrebljavaju u građevinarstvu, proizvodnji vozila, sportskih rekvizita i ortopedskih pomagala. Upotreba kompozitnih tvorevina u proizvodnji biciklističkih dijelova je u porastu zbog mogućnosti smanjenja mase konstrukcije, fleksibilnosti pri konstruiranju i korozivskoj postojanosti. Kompozitni proizvodi omogućuju fleksibilno konstruiranje kao i mogućnost oblikovanja svojstava materijala primjenjenih u specifičnoj konstrukciji.

U radu je obrađena tehnoe ekonomska analiza proizvodnje biciklističkog okvira na osnovu tehničke dokumentacije, koja je izrađena na temelju definicija osnovnih dimenzija biciklističkog okvira tvrtke Cannondale. Navedeni proizvod je izabran kao tema završnog rada, jer omogućuje izradu plana proizvodnje koristeći tehnologije koje se najčešće primjenjuju u proizvodnji kompozitnih tvorevina.

Kao tehnologije kojima je najpogodnije izraditi biciklistički okvir od kompozitnih materijala, izabrane su injekcijsko prešanje smola (RTM postupak), te proizvodnja u autoklavu. Objašnjene su karakteristike tih tehnologija, i opisane su karakteristike materijala i opreme koju je potrebno koristiti pri proizvodnji. Napravljena je tehnoe ekonomska analiza kojom su uspoređeni troškovi RTM postupka i postupka u autoklavu.

RTM postupak će se razmatrati jer ima raširenu primjenu zbog mogućnosti velikoserijske proizvodnje, dobrih svojstava dobivenog proizvoda, te niskih troškova proizvodnje. Proizvodnja u autoklavu se rabi kada je potrebna visoka kvaliteta proizvoda i dobra mehanička svojstva. Proizvodnja u autoklavu se sastoji od slaganja prepreg materijala na predoblik kalupa, a RTM postupak se sastoji od postavljanja predoblika od ojačala u kalupnu šupljinu, te ubrizgavanja smole pod tlakom. U radu će se objasniti parametri proizvodnih procesa, ukazati će se na probleme pri planiranju proizvodnih ciklusa, koji obuhvaćaju prijenos topline, promjene viskoznosti i kontrole kemijskih reakcija u multifaznom sustavu. Biciklistički okvir se konstruirao u računalnom paketu *Rhino*, te se izveo statički proračun čvrstoće metodom konačnih elemenata. U radu su definirali uzroci pojedinih proizvodnih troškova, te su opisani načini na koje se upravlja troškovima u proizvodnji. Definirani su modeli upravljanja troškovima, na temelju kojih su određeni troškovi proizvodnje biciklističkog okvira.

2. Primjena kompozitnih tvorevina u biciklističkoj industriji

Najvažniji razvojni trendovi u biciklističkoj industriji su težnja za smanjenjem mase biciklističkih dijelova, te poboljšanje aerodinamičkih svojstava. Osnovni razlog zbog kojeg se kompozitne tvorevine koriste umjesto metala u proizvodnji biciklističkih dijelova je niža gustoća polimernih kompozita u usporedbi s metalima, izborom materijala niže gustoće postiže se značajno smanjenje mase konstrukcije. Upotreba kompozitnih tvorevina u proizvodnji biciklističkih dijelova je u porastu zbog mogućnosti smanjenja mase konstrukcije, fleksibilnosti pri konstruiranju i korozijskoj postojanosti. Upotrebom kompozita postiže se fleksibilno konstruiranje i veća je mogućnost oblikovanja svojstava materijala primjenjenih u specifičnoj konstrukciji. Zahvaljujući oblikovljivosti polimernih kompozita moguće je optimirati geometriju biciklističkih dijelova i proizvesti različite oblike koji smanjuju otpor zraka. Natjecateljski bicikli izrađeni od polimernih kompozita odlikuju se dobrim aerodinamičkim svojstvima, krutošću, te specifičnom raspodjelom masa, koja poboljšava upravljivost bicikla. Na slici 2.1 prikazan je specifični oblik biciklističkog okvira.



Sl. 2.1. Specifična konstrukcija triatlonskog bicikla [1]

Porast prerade i potrošnje polimernih kompozita ima za posljedicu razvoj novih te poboljšanje postojećih postupaka prerade i porast proizvodnje strojeva i prateće opreme. Nezaustavljiv tehnički napredak postavio je i pred proizvodnju polimernih kompozita nove zahtjeve, glavni ciljevi su sniženje proizvodnih troškova i povećanje produktivnosti.

Proizvodnja kompozitnih dijelova s ugljičnim vlaknima kao ojačalom i epoksidnom smolom kao matricom je kompliciran proces koji je dugo vremena bio definiran s pomoću pokušaja i pogrešaka. Prilikom proizvodnje kompozitnih dijelova, klasičnim načinom, ugljična ojačala se režu u precizne oblike, potom se slažu i oblikuju u kalupima pri povišenom tlaku i temperaturi. Upotrebom naprednih softverskih alata moguće je eliminirati procese pokušaja i pogrešaka, koji rezultiraju znatnim otpadnim materijalom. Na slici 2.2 prikazan je proizvodni pogon s autoklavom za proizvodnju kompozitnih tvorevina.



Sl. 2.2. Proizvodni pogon s autoklavom za proizvodnju kompozitnih tvorevina [1]

Razvijeni su napredni softverski paketi za projektiranje, proizvodnju i simulacijska testiranja definirane strukture kompozita. Dassault Systèmes je razvio softverski paket koji se sastoji od CATIA Composites Design, Simulayt solutions za modeliranje povezanosti vlakana, i Abaqus FEA od SIMULIA-e za virtualno testiranje definirane strukture kompozita. Napredni

simulacijski algoritmi za oblikovanje vlakana u Simulayt-u omogućili su inženjerima da razumiju kako se vlakna ojačala deformiraju oko složene geometrije proizvoda. Rezultat su kvalitetnije površine i sprečavanje nastajanja škarta pri proizvodnji.

Softveri su potpuno integrirani i kompatibilni, te se s njima može raditi s jednog korisničkog sučelja, na taj se način prilikom proizvodnje kompozitnih materijala štedi vrijeme, uklanja greške u komunikaciji, te ubrzava proizvodni proces.

Također se razvijaju nove vrste proizvodnih procesa, kojima se brže proizvodi kompozitne dijelove, namjera je zamjeniti obradu u autoklavu s novim proizvodnim pristupima temeljenim na tlačnim procesima, inovacija se naziva Out-of-Autoklav. Uštede od Out-of-autoklav inovacije obuhvaćaju 75-postotno smanjenje temperaturnih tretmana, što znači znatno smanjene potrošnje energije i bržu isporuku kupcima. Softverska rješenja omogućuju da se smanji broj slojeva koji se koriste za proizvodnju dijelova, te se štedi vrijeme kalupljenja, poboljšava se čvrstoću i trajnost gotovog dijela, te smanjuje količinu otpadnih dijelova ojačala.

Poduzeće Cervelo vrlo uspješno primjenjuje konstrukcijske alate i proizvodne postupke u razvoju i proizvodnji biciklističkih okvira od kompozitnih tvorevina. Inženjeri u Cervelu kombinirali su analitičke i proizvodne postupke da bi proizveli biciklistički kompozitni okvir od samo 675 grama, koji je prikazan na slici 2.3. Inženjerski cilj je bio optimirati dizajn cestovnog bicikla, da bi se postigle vrhunske performanse, koristeći fleksibilnost projektiranja kompozitnih materijala, paket analitičkih konstrukcijskih alata i poboljšane proizvodne postupke. Navedeni cilj su realizirali razvojem jedinstvenih proizvodnih postupaka, uz korištenje posebne strukture ugljičnih ojačala i epoksidne smole.

U Cervelu naglašavaju da projektiranje i proizvodnja ne mogu biti odvojeni nego se moraju provoditi paralelno, takav pogled na proizvodnju omogućio je Cervelu uspon među najpoznatije proizvođače profesionalnih cestovnih bicikala.



Sl. 2.3. Biciklistički okvir Cervelo r5ca od 675 grama [1]

Projekt razvoja najlakšeg biciklističkog okvira je proistekao iz želje Cervela za razvojem boljeg procesa projektiranja kompozitnih materijala, uz integraciju projektantskih i analitičkih alata zatim testnih režima i proizvodnje. Njihov projekt je bio dugo planiran, i poduprt sponzorima, koji su poticali razvoj istraživanja kompozitnih materijala u biciklizmu. Njihov osnovni cilj je bio istraživanje kompozitnih materijala, te razvijanje novih konstrukcijskih oblika, te su uspjeli postići izvrsnost u proizvodnji kompozitnih materijala u biciklističkoj industriji. U samoj proizvodnji je korištena specijalna arhitektura ugljičnih ojačala, da bi se postiglo smanjenje količine materijala, a da se istodobno zadovolje sigurnosni zahtjevi čvrstoće i krutosti konstrukcije. U proizvodnji je ustanovljeno da je korišteno oko 350 jedinstvenih prepeg slojeva u cijeloj strukturi okvira, što je izuzetno veliki broj, i govori o kompleksnosti proizvodnje i konstruiranja, kojim se došlo do takvog sastava okvira.

Ispitivanja su pokazala da je R5ca najčvršći biciklistički kompozitni okvir koji je Cervelo ikad proizveo, a zahvaljujući naprednim tehnologijama uspjeli su sniziti masu za 25 posto u odnosu na prijašnje okvire. U Cervelu vjeruju da je njihov bicikl R5ca predvodnik i pokazatelj budućih razvojnih koraka u biciklističkoj industriji, sve zahvaljujući kompozitnim materijalima. Investiranje u kompozite im je omogućilo svladavanje široke palete alata i razvijanje nove Cervelove dizajnerske filozofije.

3. Značajke materijala korištenih u proizvodnji biciklističkih dijelova

Usporedbom materijala korištenih u proizvodnji biciklističkih dijelova zaključuje se da su čelični materijali najčešće korišteni u proizvodnji biciklističkih dijelova. Čelik pruža dobre mehaničke značajke, ali kada se traže visoka svojstva, koja se postižu sniženjem mase, nastoji se čelik zamijeniti s aluminijem, titanom ili polimernim kompozitima. Pri konstruiranju se ističe da nije bitna vrsta materijala koja se koristi, nego je bitna primjena materijala u konstrukciji, primjerice s obzirom na postojanost koroziji, i s obzirom na mehanička svojstva. Analizom materijala s obzirom na postojanost materijala koroziji, polimerni kompoziti su najpostojaniji, aluminij i titan razvijaju zaštitni film pri korodiranju, te su relativno postojani, dok je čelik znatno podložniji koroziji. Pri proizvodnji aluminijskih biciklističkih dijelova potrebno je obratiti pozornost na mogućnost pojave galvanske korozije, ako aluminij dođe u kontakt s čelikom. U proizvodnji čeličnih dijelova potrebno je provesti odgovarajuću antikorozijsku zaštitu.

Osnovna razlika između metala i kompozitnih materijala, korištenih u proizvodnji biciklističkih dijelova, je u ponašanju pri opterećenjima koja su viša od čvrstoće materijala. Analizom svojstava deformiranja materijala, zaključuje se da su metali duktilni za razliku od polimernih kompozita, metali kada su izloženi većem opterećenju nego je čvrstoća materijala prije pucanja se deformiraju, a kompozitni materijali mogu iznenadno razviti pukotinu bez prethodnih deformacija, eventualno pri oštećenju kompozitnog materijala mogu se uočiti delaminacije, koje predstavljaju odvajanje vlakana ojačala od polimerne matrice. Pukotinu kompozita karakteriziraju oštri rubovi i prekinuta vlakna.

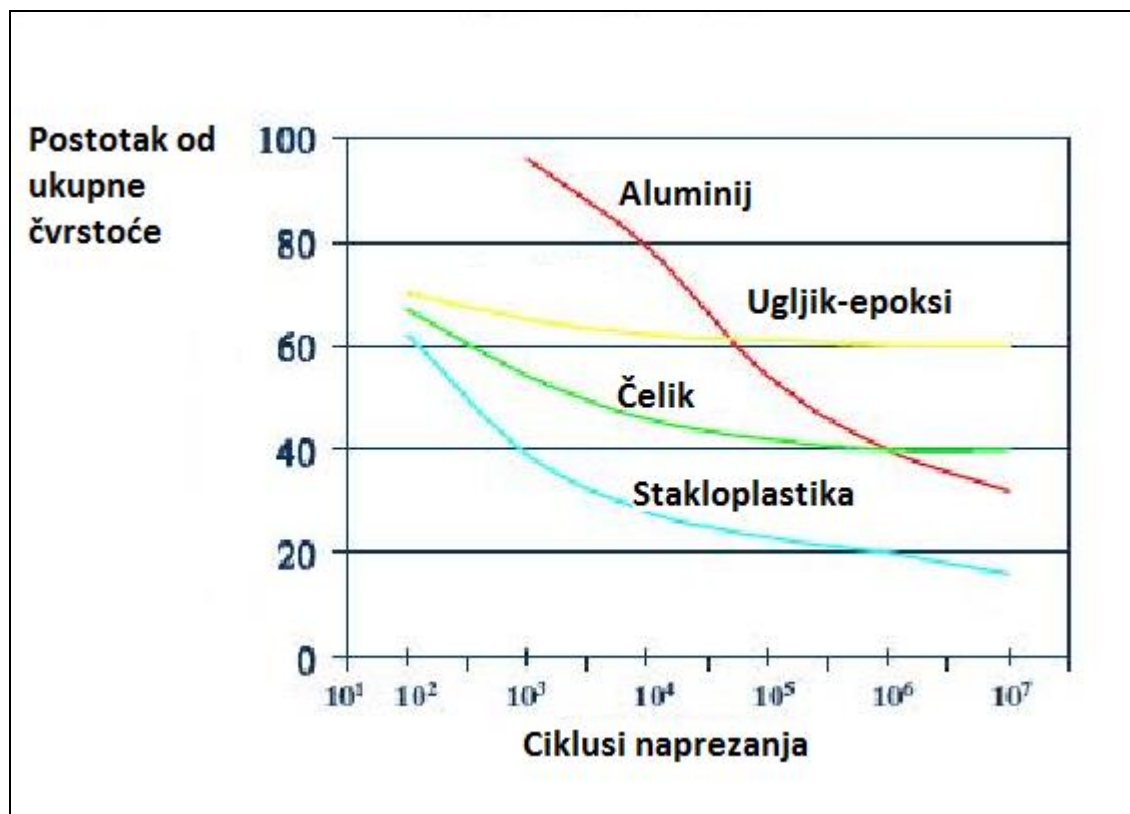
Analizom gustoće materijala, koja se izražava u gramima po jedinici volumena, gustoća čelika je $7,8 \text{ g/cm}^3$, titana $4,5 \text{ g/cm}^3$, aluminija $2,75 \text{ g/cm}^3$, a gustoća polimernog kompozita s ugljičnim vlaknima je $1,42 \text{ g/cm}^3$, izborom materijala niže gustoće postiže se značajno smanjenje mase konstrukcije.

Polimerni kompoziti imaju najvišu specifičnu čvrstoću, koja predstavlja omjer čvrstoće i mase materijala (tablica 3.1).

Tablica 3.1. Usporedba mehaničkih svojstava metalnih i kompozitnih materijala [2]

Materijal	Gustoća ρ (g/mm ³)	Vlačni modul E (GPa)	Vlačna čvrstoća σ (MPa)	Specifični modul (E/ ρ)	Specifična čvrstoća (σ/ρ)
Aluminij 7075 T6	0,0028	72	570	25,7	203,6
Titan 6Al 4V	0,0045	114	1000	25,3	222,2
Čelik Maraging 300	0,0080	207	2000	25,9	250,0
Ugljik/epoksi M46J UD	0,0018	250	1415	138,9	786,1
Ugljik/epoksi T800 UD	0,0018	154	2570	85,6	1427,8

Vlakna ojačala opisuju se kao kostur koji nosi opterećenja, a epoksidna matrica služi za povezivanje vlakana ojačala i prenosi opterećenja na ojačalo, te štiti kompozit od atmosferskih utjecaja. Tijekom konstruiranja osnovna prednost kompozitnih tvorevina su njihova anizotropna mehanička svojstva, a omjeri anizotropije se mogu mijenjati pri proizvodnji izborom orijentacije vlakana ojačala. Ugljična vlakna mogu biti postavljena u specifičnim smjerovima, te je moguće smanjenje mase u dijelovima koji nisu znatno opterećeni, a također je moguće povećanje čvrstoće u kritično opterećenim dijelovima konstrukcije. Metali su izotropni, te imaju jednaka mehanička svojstva u svim smjerovima. Upotrebom kompozita postiže se fleksibilno konstruiranje i veća je mogućnost oblikovanja svojstava materijala primjenjenih u specifičnoj konstrukciji. Na slici 3.1 je prikazano ponašanje materijala pri dinamičkim naprezanjima, ugljik-epoksi kompozit zadržava znatan iznos vrijednosti statičke vlačne čvrstoće i nakon 10^7 ciklusa dinamičkih naprezanja.



Sl. 3.1. Usporedba ponašanja pojedinih materijala pri dinamičkim naprezanjima [2]

3.1. Značajke duromernih matrica

U proizvodnji polimernih kompozitnih tvorevina, najčešće se koriste za matrice duromerne smole, one imaju trodimenzionalnu umreženu strukturu, a kao posljedica toga imaju višu čvrstoću i viši modul elastičnosti od plastomera. Također su kemijski postojane, imaju toplinsku i dimenzijsku stabilnost, odlikuju se povoljnim preradbenim svojstvima jer imaju nisku viskoznost. Reakcije duromernih smola se opisuju s pomoću kinetičkih modela, teorije želiranja i reoloških modela. Svrha tih modela je definirati tok smole, prijenos topline, te reakcije polimerizacije pri proizvodnji određenih vrsta polimera. Upotrebom navedenih modela cilj je postići optimalno odvijanje proizvodnog ciklusa.

Od duromernih smola najviše se rabe poliesteri, koji se najčešće primjenjuju pri proizvodnji staklenim vlaknima ojačanih kompozitnih tvorevina. Na tržištu je prisutan veliki broj formulacija navedenih smola koje omogućuju širok raspon svojstava tih polimernih materijala. Epoksidne smole znatno su skuplje te se primjenjuju većinom u zrakoplovstvu, one imaju bolja mehanička svojstva te bolju postojanost prema vlazi. U tablici 3.2 i 3.3 su istaknute osnovne značajke duromernih smola.

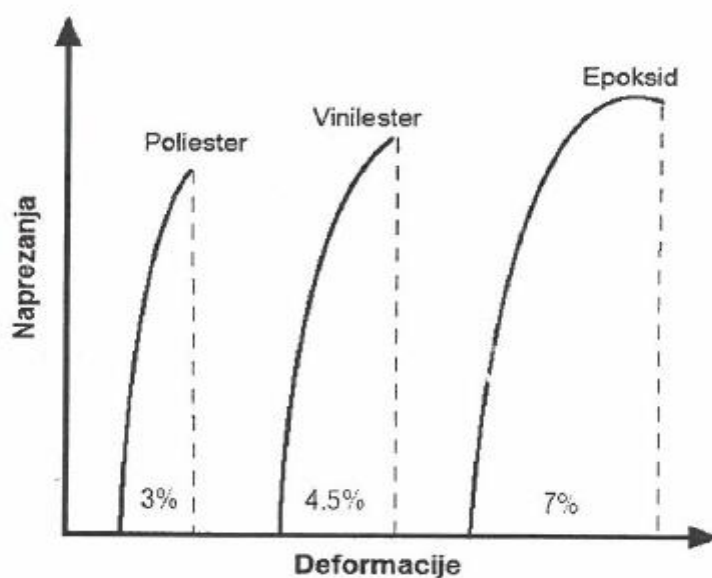
Tablica 3.2. Usporedba osnovnih značajki epoksi i poliesterske smole [3]

SVOJSTVO		EPOKSI SMOLA	POLIESTERSKA SMOLA
Gustoća	[g/cm ³]	1,1-1,4	1,2-1,5
Poissonov koeficijent	-	0,38-0,4	0,37-0,39
Vlačna čvrstoća	[MN/m ²]	35-100	40-90
Modul vlaka	[GN/m ²]	2,0-6,0	2,5-3,5
Savojna čvrstoća	[MN/m ²]	–	80-140
Savojni modul	[GN/m ²]	–	3,5-4,0
Tlačna čvrstoća	[MN/m ²]	100-200	90-250
Prekidno istezanje	[%]	1,0-6,0	2
Toplinska provodnost	[W/m°C]	0,1	0,2
Koef. toplinskog širenja	[10 ⁻⁶ /°C]	60	100-200
Temperatura razaranja	[°C]	50-300	50-110
Stezanje pri otvrdnjavanju	[%]	1,0-2,0	1,0-8,0
Upijanje vode, 24 h na 20 °C	[%]	0,1-0,4	0,1-0,3

Tablica 3.3. Prednosti i nedostaci pojedinih vrsta duromernih smola [3]

Vrsta smole	Poliester	Vinil ester	Epoksi
Prednosti	Lako se primjenjuje	Vrlo visoka kemijska otpornost (u odnosu na okoliš)	Visoke mehaničke osobine
			Visoka vodootpornost
	Najjeftinija od svih smola	Bolje mehaničke osobine od polyestera	Mogućnost dugog vremena rada
			Otpornost na visoke temperature do 140°C mokro / 220°C suho
	(1,5 – 3 €/kg)		Malo utezanje pri otvrdnjavanju
Nedostaci	Osrednje mehaničke osobine	Za postizanje boljih svojstava potreban je naknadni tretman	Skuplje od vinylestera
	Visoka emisija stirena kod otvorenih kalupa	Visoki sadržak stirena	(5 – 24 €/kg)
		Skuplje od polyestera	Agresivnost kod rukovanja
	Veliko utezanje pri otvrdnjavanju	(3 – 6 €/kg)	Osjetljiv na nepotpuno miješanje komponenata
	Ograničeni raspon vremena rada	Veliko utezanje pri otvrdnjavanju	

Na slici 3.2 je prikazan odnos naprezanja i deformacije do loma za tri vrste duromernih smola.



Sl. 3.2. Usporedba deformacija duromernih smola [4]

Kod duromernih smola postoje dva tipa umreživanja, lančani (nezasićeni poliesteri, vinilesteri), i stupnjeviti (epoksidne smole). Pri lančanom umreživanju polimerne molekule se stvaraju vezanjem monomera na krajeve lanaca molekula. U drugom slučaju pri stupnjevitoj poliadiciji polimerni lanac molekula se povećava zbog umreživanja oligomera i monomera[5].

Materijali matrice moraju biti žilavi da bi prenosili opterećenje na vlakna ojačala te onemogućavaju da pukotine napreduju kroz cijeli kompozit. Funkcija matrice je da zaštiti vlakna od površinskog oštećivanja do kojih može doći mehaničkom abrazijom ili kemijskim reakcijama s okolnim medijima. Adhezijske veze, veze između vlakana i matrice moraju biti dostatne da umanje izvlačenje vlakana. Te su veze ključne za maksimiranje prijenosa naprezanja s matrice na ojačala.

Fizikalna svojstva umreženih smola ovise o nizu parametara od kojih su najvažniji: kemijski sastav, pravilnost i raspored lanaca makromolekula, vrsta i veličina supstituenata, vrsta i broj ograna, pojava umreživanja, fleksibilnost lanaca, veličina i raspodjela molekulnih masa. Tehnička svojstva umreženih polimera mogu se mijenjati utjecajem na granatost molekula, veličinu molekulne mase, te na uređenost strukture.

Epoksidnu smolu karakterizira kemijska struktura *epoksidne skupine* koja se sastoji od veza atoma ugljika i kisika. Odlikuje se niskom razinom skupljanja, odličnom adhezijom i mehaničkim svojstvima, te kemijskom postojanošću. Epoksidi se primjenjuju kao ljepila (epoksi-amin), i kao strukturna veziva i matrice u konstrukcijama od kompozitnih materijala. Osnovni nedostatak epoksidne smole je krhkost, koja je posljedica umrežene strukture. Postoje dva načina za smanjenje krhkosti; jedan je dodavanje spojeva koji djeluju po principu spužve u kemijskoj strukturi epoksidne umrežene strukture, a drugi način je utjecaj na strukturu monomera koji se postiže izborom umreživala. Vrsta umreživala utječe na svojstva umrežene smole, jer ona određuju tip umreživajućih reakcija i utječu na kinetiku umreživanja. Najčešće se koriste aminska umreživala, kao primjerice diaminodifenilsulfon DDS i metilen dianilin MDA. Postoje različiti tipovi epoksidne smole, najčešće se koristi DGEBA i TGDDM smola. Pri umreživanju epoksidne smole dolazi do reakcija između epoksida i aaminskih kemijskih struktura, te nastaju strukture epoksida, primarnog, sekundarnog i tercijarnog amina. Reakcije umreživanja aaminskih i epoksidnih skupina pokazuju kompleksne kinetičke pojave, te se smatraju autokataličnim reakcijama, može ih se opisati sljedećom jednačinom:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = (k_1 + k_2 \alpha^m)(1 - \alpha)^n, \text{ a } k_i = A_i \exp(-E_{ai} / RT) \quad (3.1)$$

Pojedini autori su utvrdili vrijednosti kinetičkih parametara koji se primjenjuju u navedenom modelu. Primjerice toplina reakcije umreživanja iznosi 142 – 711 J/g, A -frekvencijski faktor $6 \cdot 10^4$, E_a – aktivacijska energija 41857 – 133945 J/mol, razina reakcije 1-3. Temperatura umreživanja za sustav DGEBA/m-PDA iznosi od 97 do 130 °C, za sustav DGEBA/DDS od 85 do 218 °C.

3.2. Značajke ojačala

Materijali ojačala sastoje se od staklenih, ugljičnih ili aramidnih vlakana, koja su pletena u tkanine kojima se lako rukuje tijekom proizvodnje. Staklenim vlaknima ojačan kompozit sastoji se od kontinuiranih ili diskontinuiranih vlakana koje se nalaze u polimernoj matrici, te se taj tip kompozita primjenjuje u najvećim količinama zbog njihove povoljne cijene, dobrih mehaničkih svojstava te jednostavnosti proizvodnje.

Ugljična vlakna su visokokvalitetna ojačala koja se primjenjuju u suvremenim kompozitima, te imaju najviši specifični modul i najvišu specifičnu čvrstoću, koju zadržavaju pri povišenim temperaturama, također su razvijeni relativno jeftini postupci proizvodnje. Ugljična vlakna obično su prevučena zaštitnim epoksidnim slojem koji poboljšava vezanje s polimernom matricom. U tablici 3.4 su prikazana mehanička svojstva pojedinih vrsta ojačala, a na slici 3.3 je prikazan oblik rovinga od ugljičnih ojačala mase 220 g/m^2 , koji je dostupan na tržištu.

Tablica 3.4. Osnovna mehanička svojstva pojedinih vrsta ojačala [3]

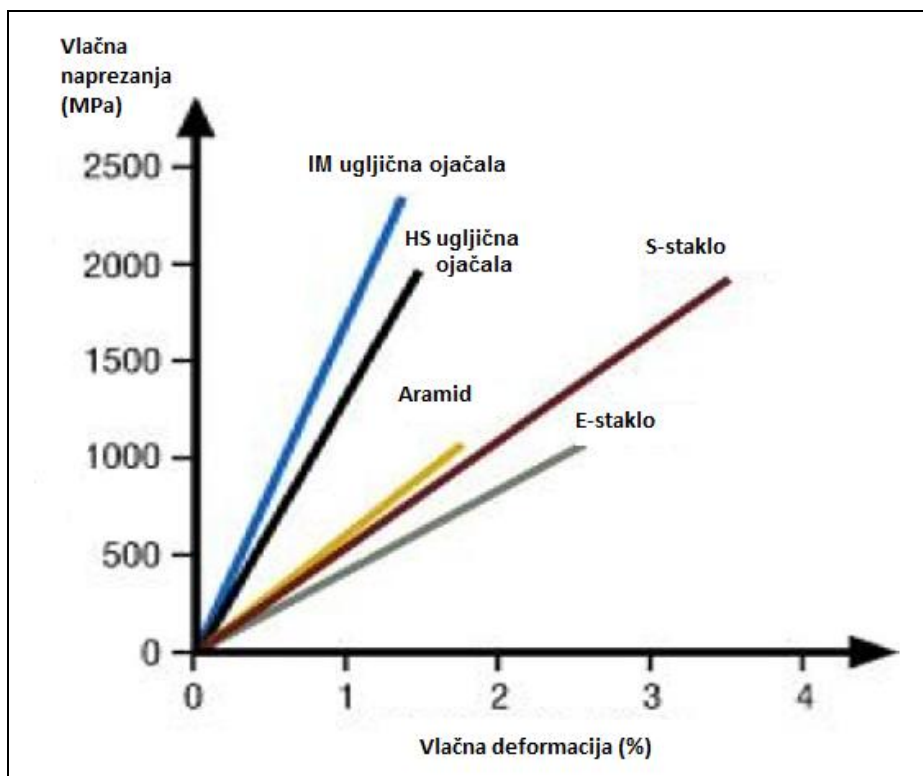
TIP VLAKNA	Gustoća	Promjer	Vlačna čvrstoća	Modul vlaka	Prekidno istezanje	Specif. vlačna čvrstoća	Specif. vlačni modul
	[kg/m ³ 10 ³]	[mm]	[GPa]	[GPa]	[%]	[GPa]	[GPa]
Poliester	1,38		1	11	14,5	0,72	8
E-staklo	2,54	8,0-14,0	3,4	72	1,8-3,2	1,34	2,8
S-staklo	2,49	8,0-14,0	4	86	4-4,5	1,57	34
Kevlar 49	1,45	11,9	3,6	130	2,2-2,9	2,48	90
Kevlar 29	1,44	12,1	2,9	69	4,4	2,02	49
Ugljično visoke čvrstoće (HS)	1,74	7,6-8,6	3,1	277	1	1,77	130
Ugljično visokog modula (HM)	1,81	7,0-9,7	2,1	390	0,5	1,16	215



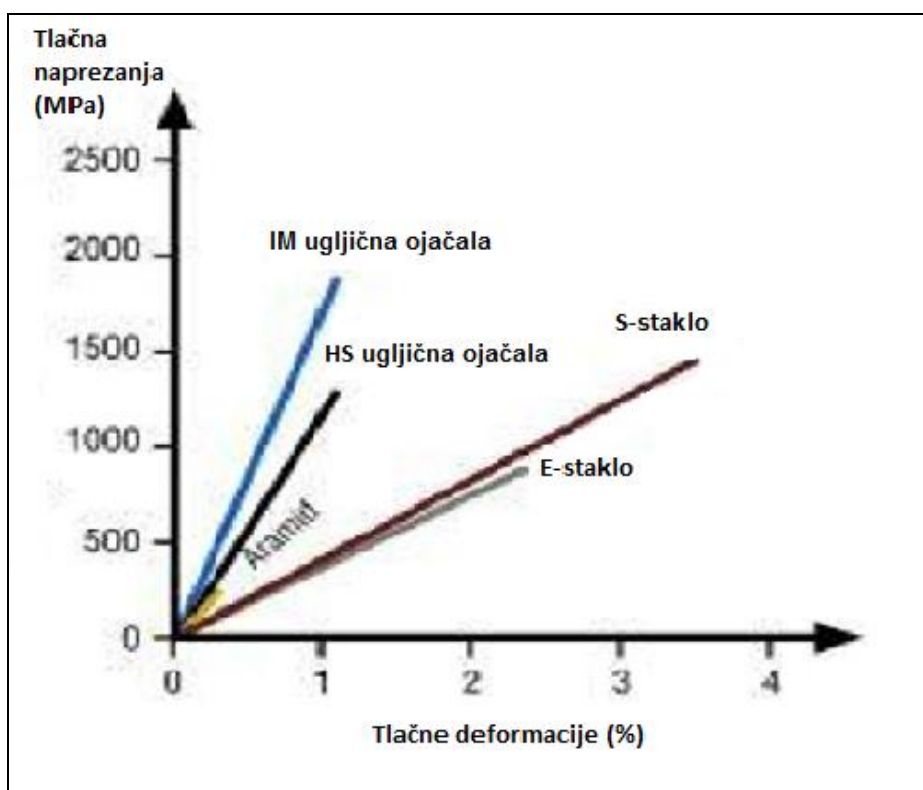
Sl. 3.3. Roving od ugljičnih ojačala mase 220 g/m^2 [6]

Prema osnovnim mehaničkim značajkama ugljična ojačala se klasificiraju kao: HS (High Strength – visoke čvrstoće), IM (Intermediate Modulus – umjerenog modula elastičnosti), HM (High Modulus – visokog modula elastičnosti), i UHM (Ultra High Modulus – vrlo visokog modula elastičnosti) ojačala.

Ugljična ojačala imaju najveću specifičnu vlačnu i tlačnu čvrstoću, te krutost među komercijalnim vlaknima. Imaju veliku postojanost koroziji, puzanju i zamoru. Žilavost tih ojačala je niža od žilavosti aramidnih i staklenih vlakana, a posebno su krhka HM i UHM ojačala. Na slici 3.4 i 3.5 prikazana je otpornost materijala i kompozita na njihovoj bazi na deformaciju s obzirom na iznos naprezanja. Nagib svake krivulje predstavlja krutost pojedinog materijala, što je krivulja strmija to je veća krutost ojačala. Na slikama se može vidjeti da se svi materijali osim aramida ponašaju jednako pri vlačnim i tlačnim naprezanjima.



Sl. 3.4. Odnos vlačnih naprezanja i deformacije različitih vrsta ojačala [7]



Sl. 3.5. Odnos tlačnih naprezanja i deformacije različitih vrsta ojačala [7]

Hibridni kompoziti se dobivaju upotrebom više vrsta vlakana u jedinstvenoj matrici. Njihova velika prednost je mogućnost kombinacije mehaničkih svojstava uz sniženje cijene, korištenjem jeftinijih vlakana. Najčešće se koristi kombinacija ugljičnih i staklenih vlakana, gdje ugljična imaju visoku cijenu, te kombiniranjem sa staklenim vlaknima se snižava cijena proizvoda uz zadovoljavajuća mehanička svojstva. Hibridni laminati se mogu slagati iz različitih slojeva vlakana s različitim udjelom vlakana u pojedinom sloju, na taj način se izbjegava iznenadni lom kompozita, zbog slojeva koji imaju različite module elastičnosti.

Kontinuirana vlakna se teže proizvode i ugrađuju u matricu, te se najčešće koriste diskontinuirana vlakna s velikim omjerom duljina/promjer, ona se znatno lakše ugrađuju u matricu i dovode do visoke krutosti i čvrstoće. Viši volumni udio vlakana ima za posljedicu povišenje čvrstoće i krutosti te se kreće od 40 - 70%, udio vlakana je određen sposobnošću da se vlakna okruže materijalom matrice. Pojedini proizvodni postupci su razvijani s ciljem ujednačenog rasporeda vlakana i visokim stupnjem njihove usmjerenosti.

Mehanička svojstva kompozitnih tvorevina ojačanih kontinuiranim usmjerenim vlaknima su anizotropna. Usmjerena jednosmjerna vlakna daju maksimalnu krutost i čvrstoću kada je opterećenje paralelno sa vlaknima, te su tada mehanička svojstva anizotropna, ukoliko je to nepovoljno vlakna se mogu polagati pod različitim kutevima. Time se žrtvuje maksimalna čvrstoća, ali se postižu jednoličnija svojstva u različitim smjerovima. Nastoje se koristiti vlakna smanjenog promjera, jer je tada manja vjerojatnost prisutnosti kritične plohe tečenja, koja može dovesti do loma materijala.

3.3. Prepreg materijali

Prepreg kompozitni materijali postaju sve učestaliji u kompozitnoj industriji zbog njihove jednostavnosti korištenja, konzistentnih svojstva, i visoke kvalitete površine. Prepreg je armatura od staklenih ili ugljičnih vlakana koja je prethodno impregnirana smolom. Najčešće, smola je epoksid, međutim i druge vrste smola mogu se koristiti, uključujući većinu duromernih i plastomernih smola.

Pri proizvodnji duromernih preprega, smola u formi tekućine se nanosi na vlakna ojačala, a višak smole se uklanja. U međuvremenu, epoksidna smola prolazi djelomično otvrdnjavanje pri povišenoj temperaturi, to se naziva B-faza.

U B-fazi, smola je djelomično otvrdnuta, i obično ljepljiva. Kada se prepregu impregniranom smolom, opet dovede toplina, često se vraća nakratko u tekuće stanje prije potpunog umreživanja.

Najveća prednost upotrebe preprega je njihova jednostavnost rukovanja u proizvodnji. Na primjer, pri proizvodnji nije potrebno korištenje tekuće smole u zatvorenom ili otvorenom kalupu, niti pripremanje tkanine i epoksidne smole. Epoksi prepreg dostupan je namotan na roli i ima željeni omjer smole i vlakana. Na slici 3.6 je prikazan oblik role prepreg materijala mase 80 g/m^2 , koji je dostupan na tržištu.



Sl. 3.6. Rola prepreg materijala mase 80 g/m^2 [8]

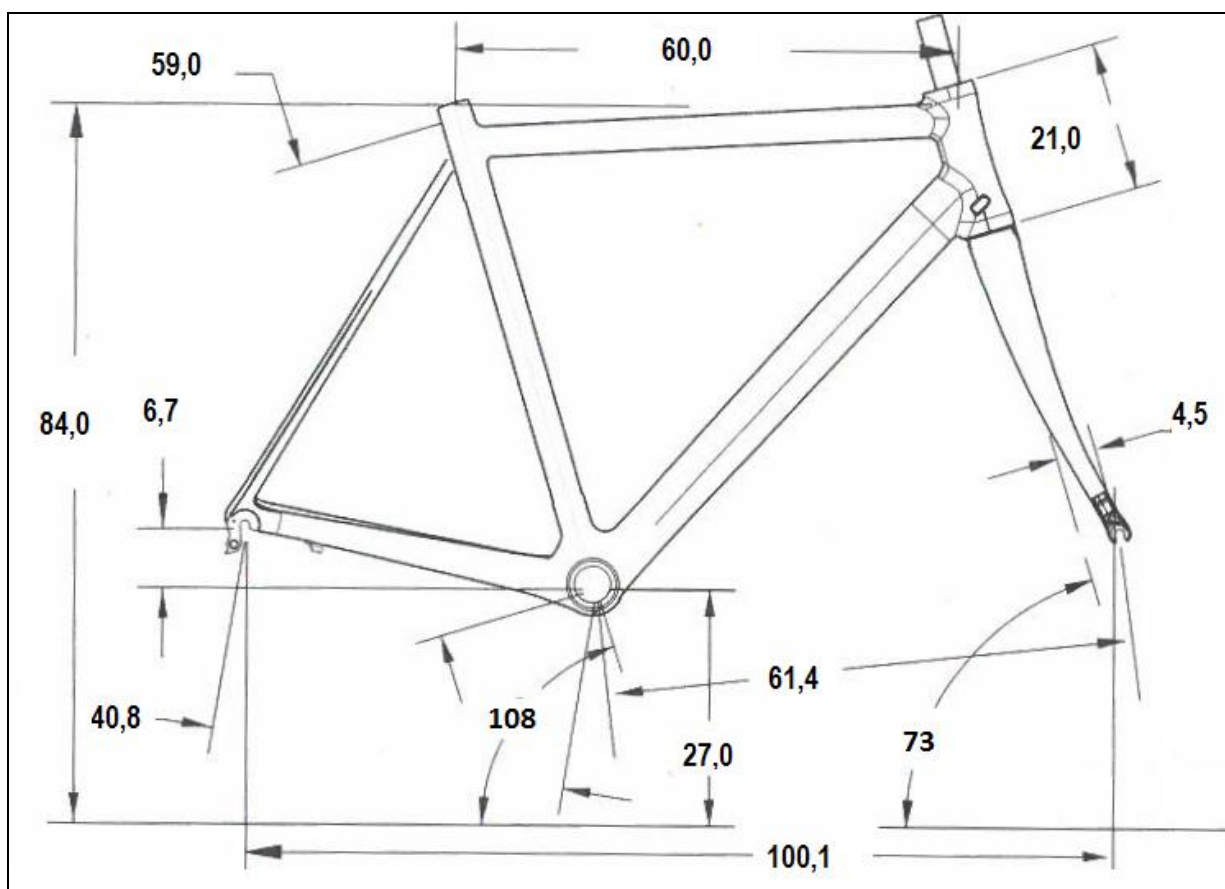
Većina preprega ima zaštitni film na obje strane, koji ga štite tijekom transporta i priprema. Pri proizvodnji prepreg se reže na željeni oblik, te polaže u kalup ili alat. Zatim se toplina i tlak dovode na određeno vrijeme. Neki od najčešće korištenih preprega umreživaju jedan sat, pri 120°C , ali različiti sustavi preprega su dostupni pri nižim i višim temperaturama umreživanja i različitog vremena trajanja. Ispitivanjima je utvrđeno da prepreg mora biti djelomično impregniran ili mora imat nabore, kako bi postojale zone za odvođenje zraka pri slaganju slojeva. Pri slaganju slojeva preprega često se provodi vakuumiranje slojeva koje omogućuje uklanjanje zraka između slojeva i kompaktiranje slojeva. Vakuumiranje bi se trebalo provoditi na svakih pet novo dodanih slojeva i trebalo bi trajati oko 15 minuta.

4. Modeliranje geometrije biciklističkog okvira

U ovom poglavlju će se opisati postupak modeliranja biciklističkog okvira koji će biti analiziran u radu. Objasniti će se postupak kojim je određena geometrija biciklističkog okvira, te debljina stijenki. Provest će se teorijsko određivanje strukture i mase biciklističkog okvira, a također će se izraditi konkretan proizvodni plan s definiranom strukturom ojačala. U zadnjem poglavlju će se analizirati mogućnosti upotrebe sendvič kompozita u proizvodnji biciklističkih dijelova.

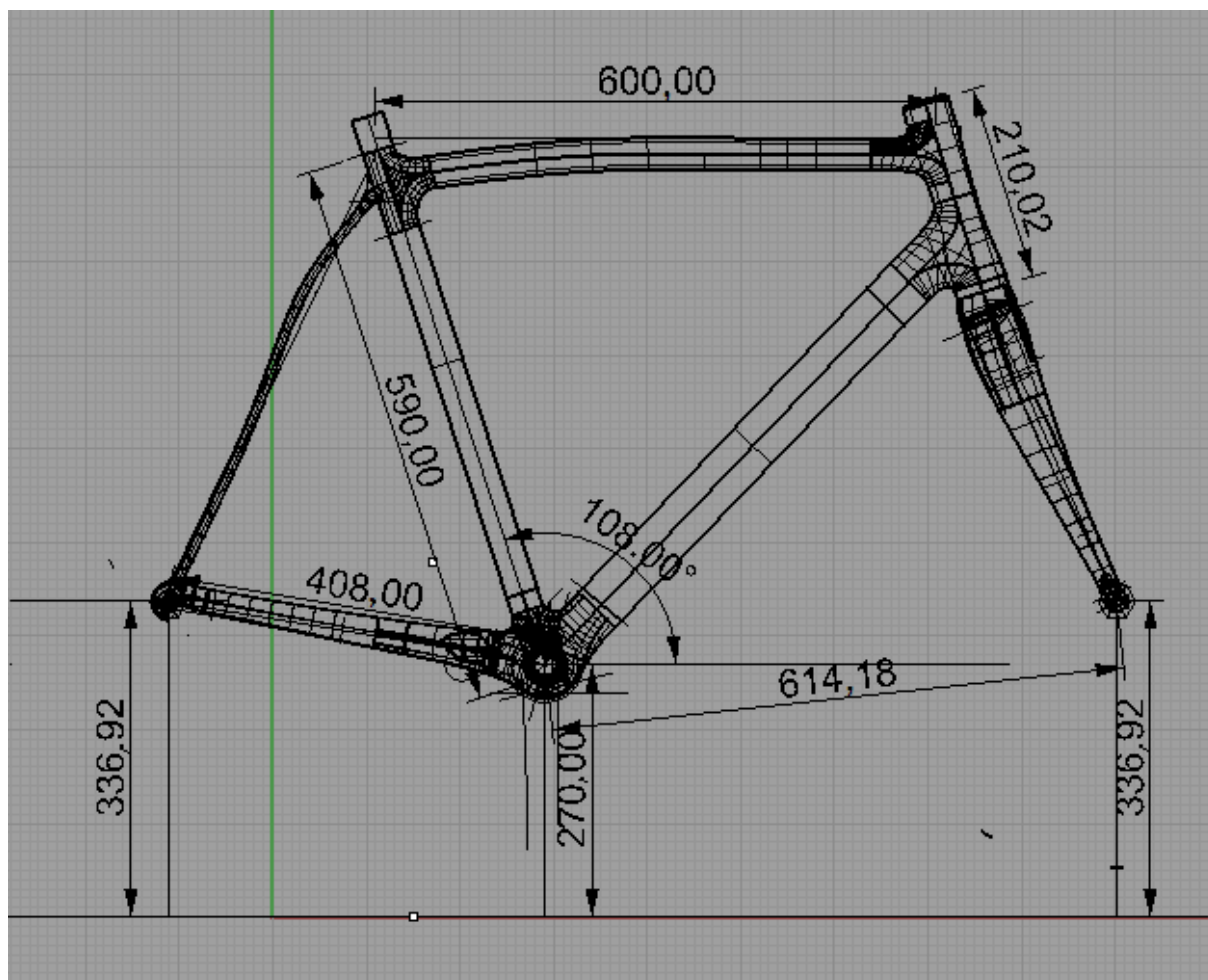
4.1. Modeliranje biciklističkog okvira

Geometrija biciklističkog okvira je određena prema dimenzijama cestovnih bicikala od poduzeća Cannondale. Na slici 4.1 su definirane potrebne dimenzije prema kojima je konstruiran biciklistički okvir koji će bit analiziran u ovom radu.

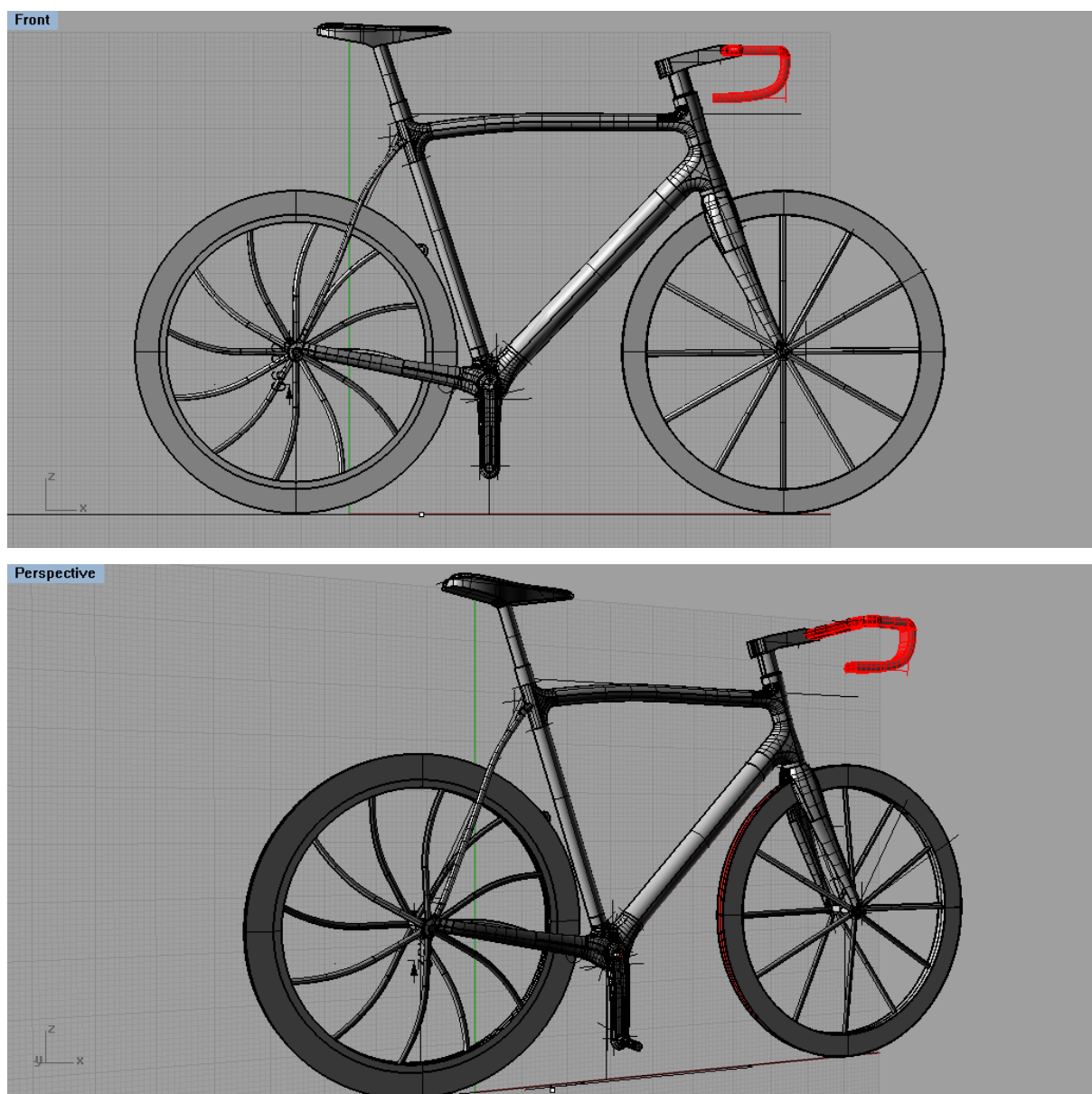


Sl. 4.1. Definicija osnovnih dimenzija biciklističkog okvira, izraženo u cm [9]

Na slici 4.2 su prikazane osnovne dimenzije konstruiranog okvira, a na slici 4.3 je 3D prikaz konstrukcije bicikla.



Sl. 4.2. Osnovne dimenzije konstruiranog biciklističkog okvira



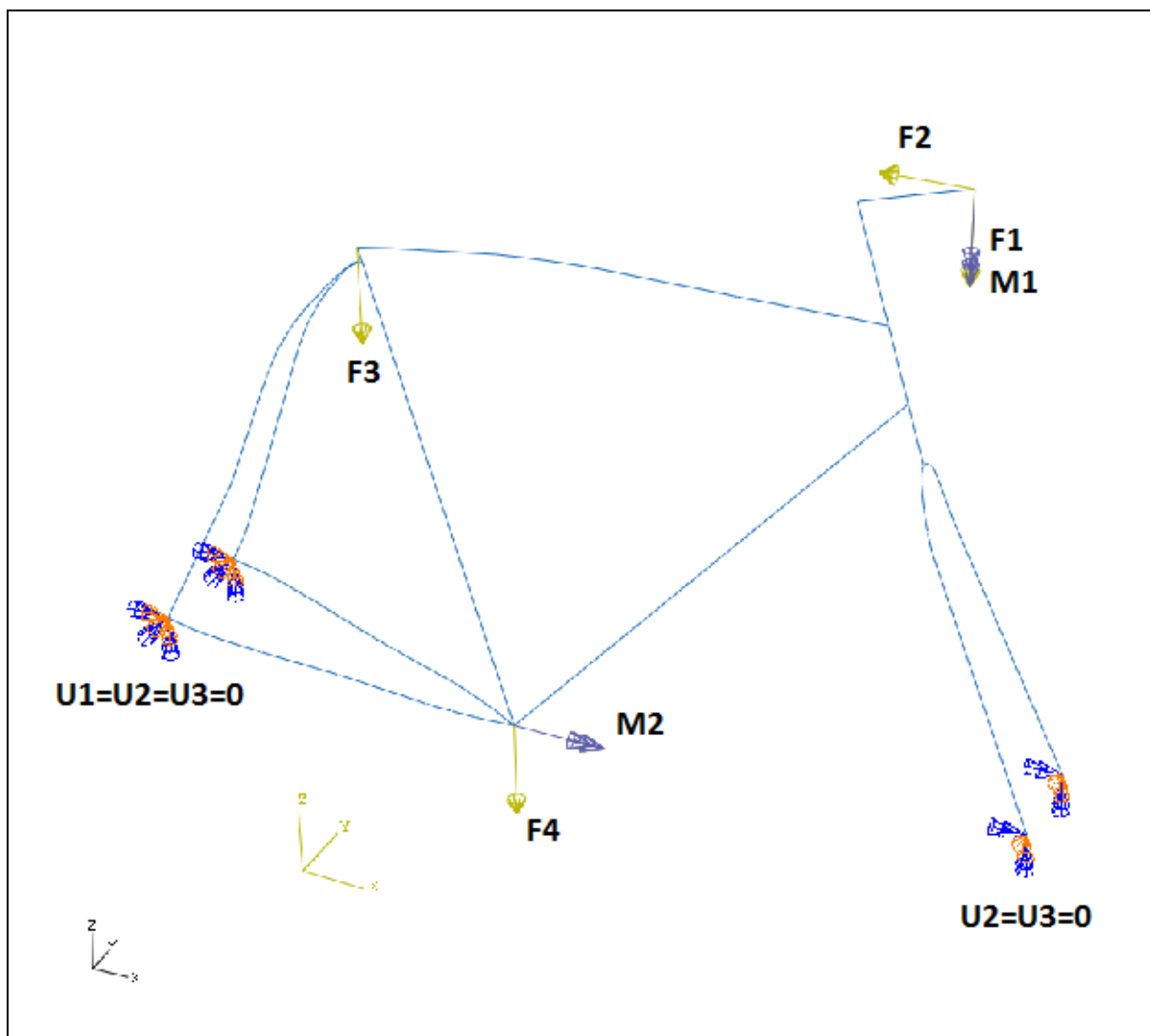
Sl. 4.3. 3D prikaz konstruiranog biciklističkog okvira

4.2. Određivanje debljine stijenke metodom konačnih elemenata

Debljinu stijenke t na pojedinim dijelovima biciklističkog okvira se odredilo metodom konačnih elemenata u softveru Abaqus. Na slici 4.4 su prikazana opterećenja i rubni uvjeti koji su korišteni pri modeliranju proračunskog modela.

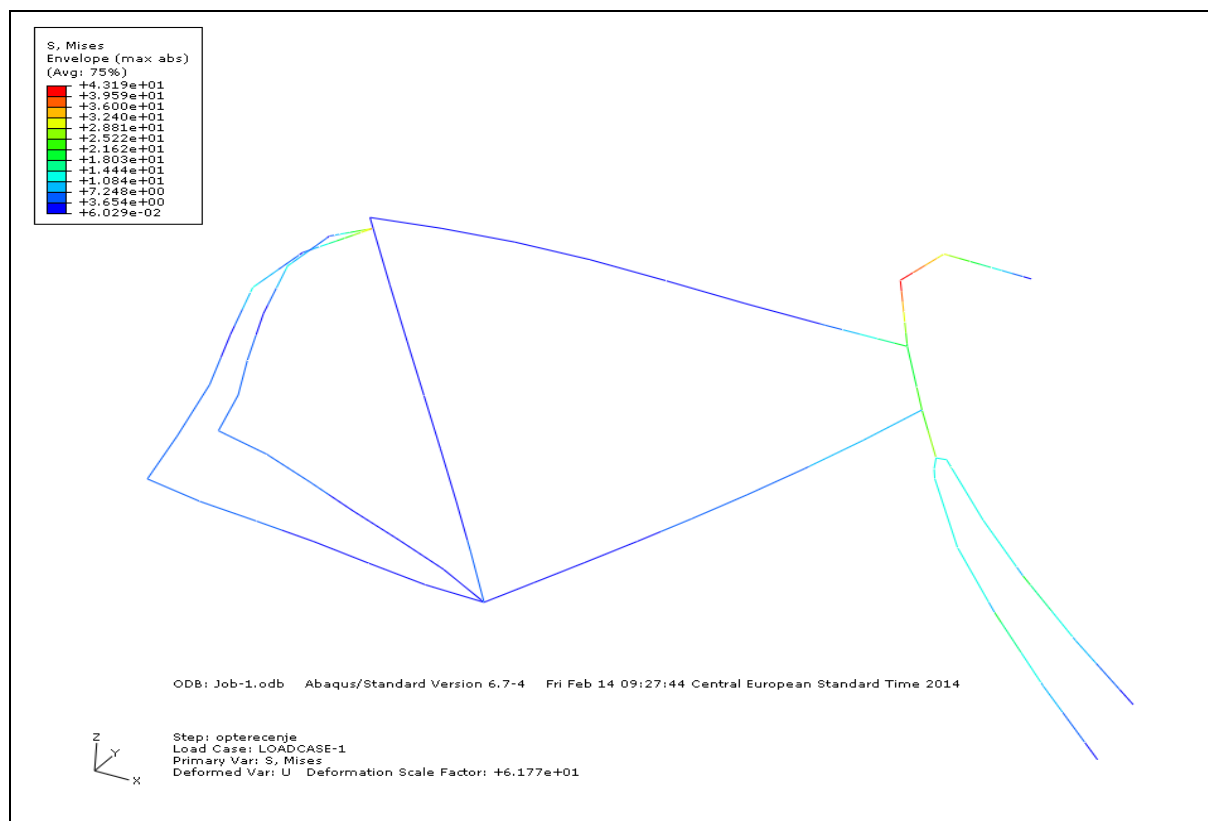
Rubni uvjeti su: a) uklještenje stražnjih vilica $U1=U2=U3=0$, te b) spriječen pomak prednjih vilica u smjeru osi y i z , tj. $U2=U3=0$.

Opterećenja su: $F1=800$ N, $F2=400$ N, $F3=500$ N, $F4=900$ N, $M1=18000$ Nmm, $M2=9000$ Nmm. Opterećenja su podijeljena u dvije skupine (loadcase): $L1= F1$ i $F4$, $L2= F2, F3, M1$ i $M2$. Modul elastičnosti kvaziizotropnog kompozitnog laminata $(0,+45,-45,90)$ iznosi $E=70000$ MPa.



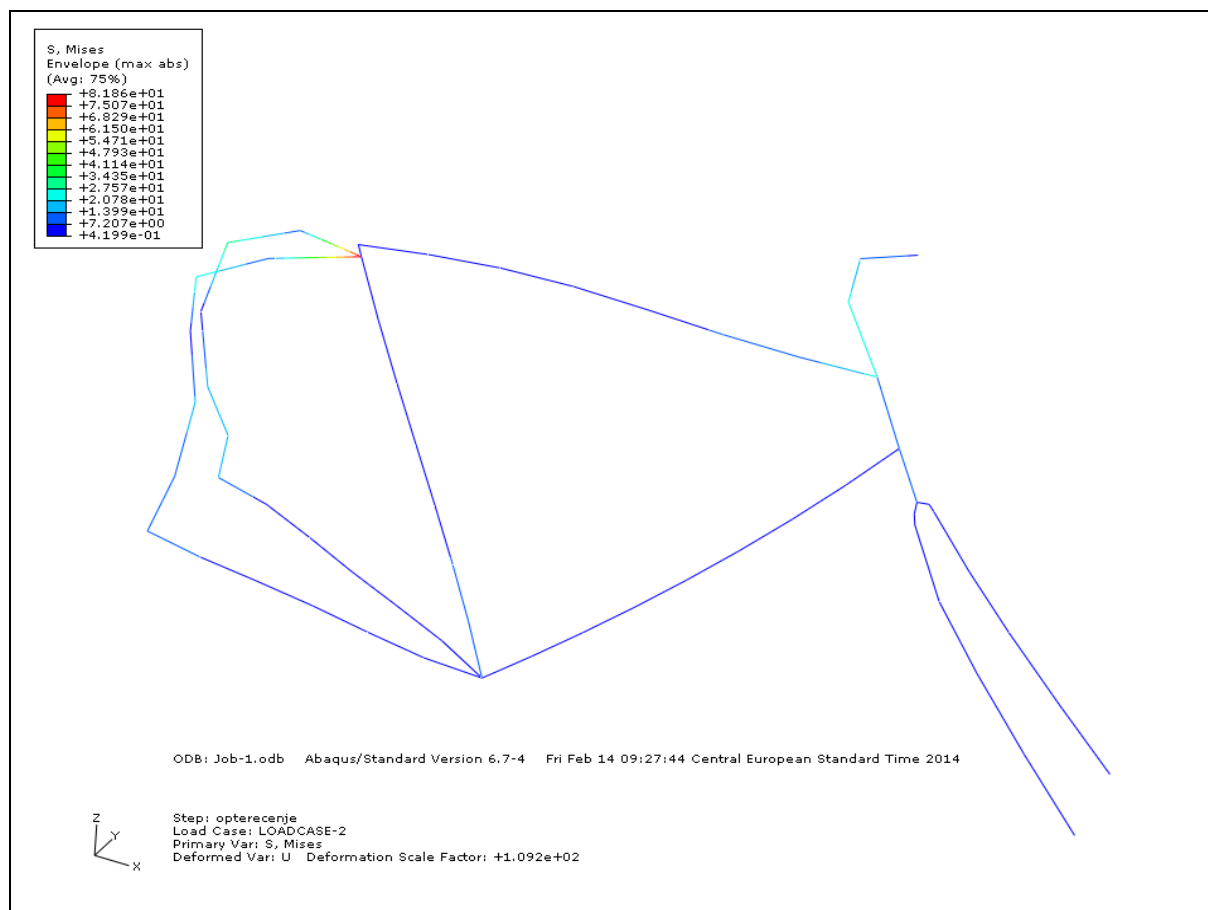
S1. 4.4. Proračunski model biciklističkog okvira

Metodom konačnih elemenata su dobivena naprezanja pojedinih dijelova biciklističkog okvira, naprezanja su izražena s pomoću 4. teorije čvrstoće. Na slici 4.5 su prikazana normalna naprezanja od prve skupine opterećenja (*L1*), maksimalno naprezanje iznosi 43 MPa.



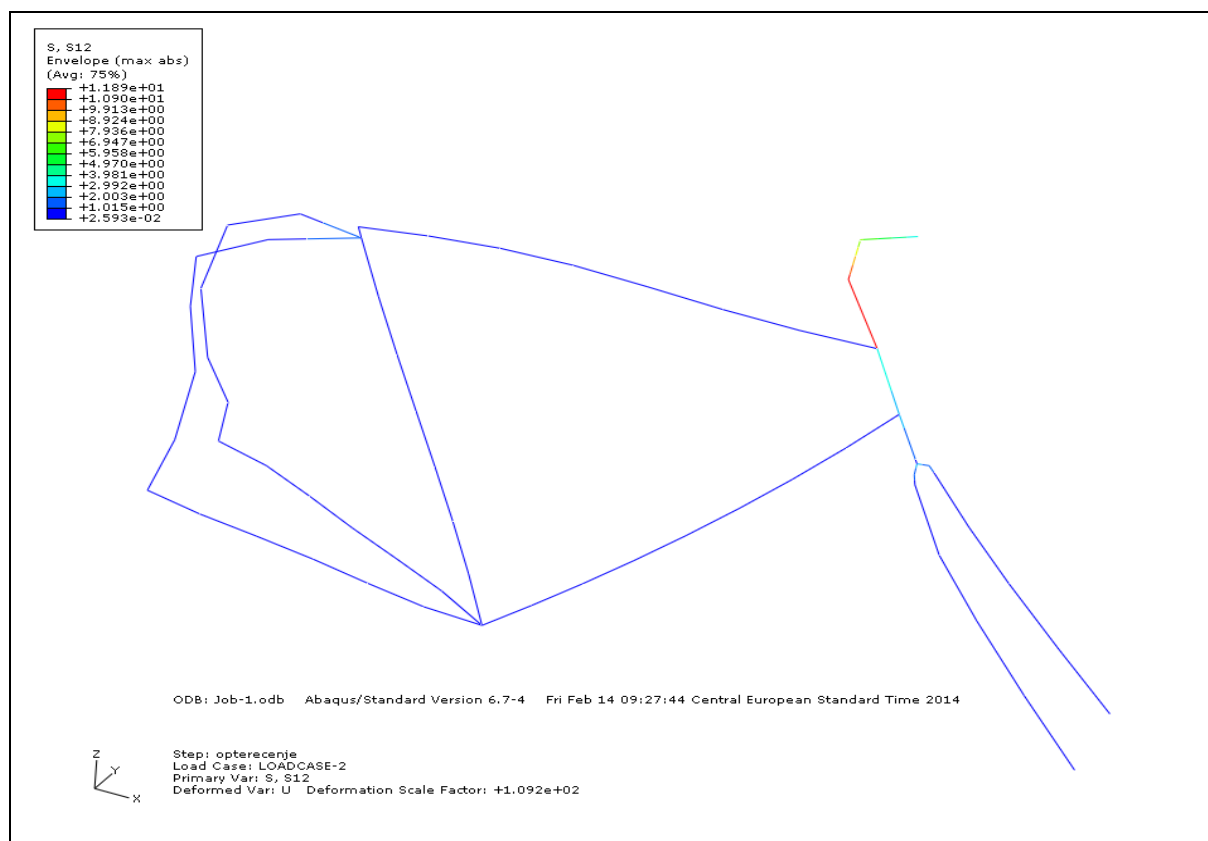
Sl. 4.5. Normalna naprezanja od prve skupine opterećenja (*L1*)

Na slici 4.6 su prikazana normalna naprezanja od druge skupine opterećenja ($L2$), maksimalno naprezanje iznosi 81 MPa.



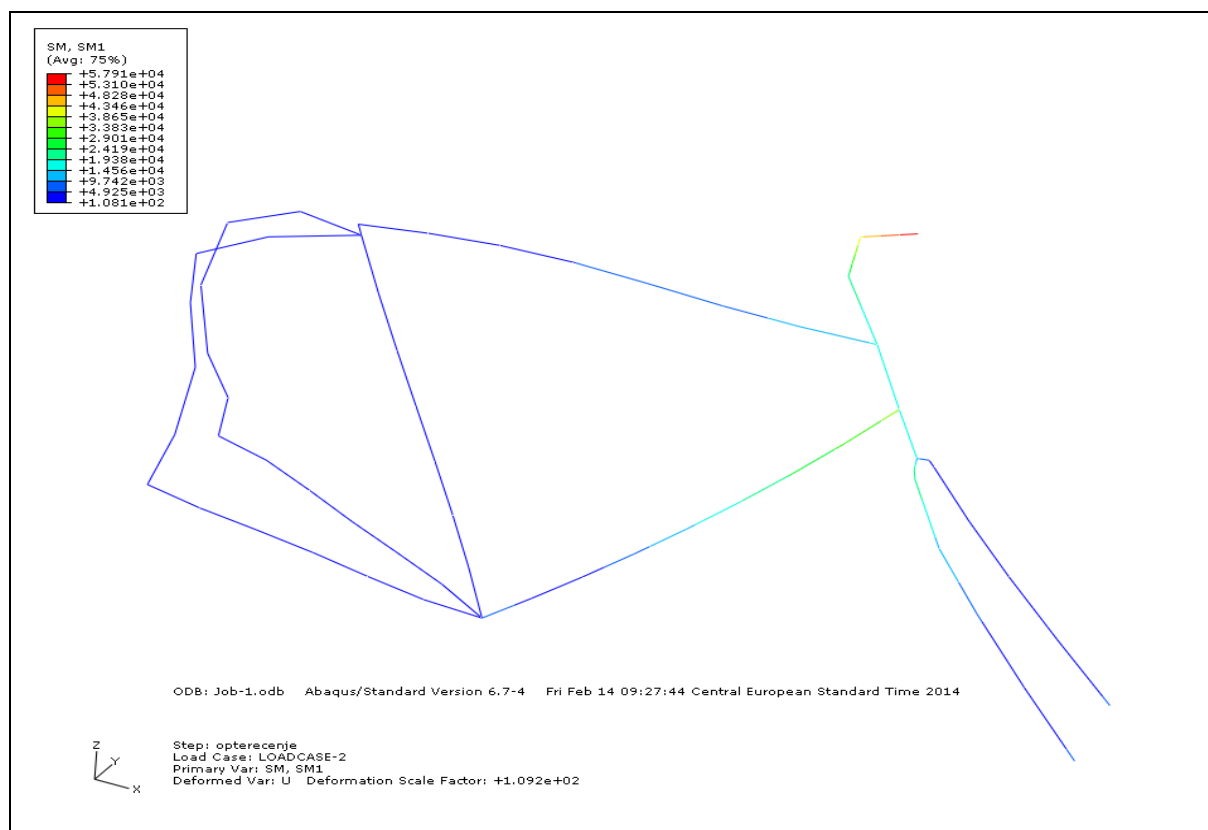
Sl. 4.6. Normalna naprezanja od druge skupine opterećenja ($L2$)

Na slici 4.7 su prikazana smična naprezanja od druge skupine opterećenja ($L2$), maksimalno smično naprezanje iznosi 11 MPa.

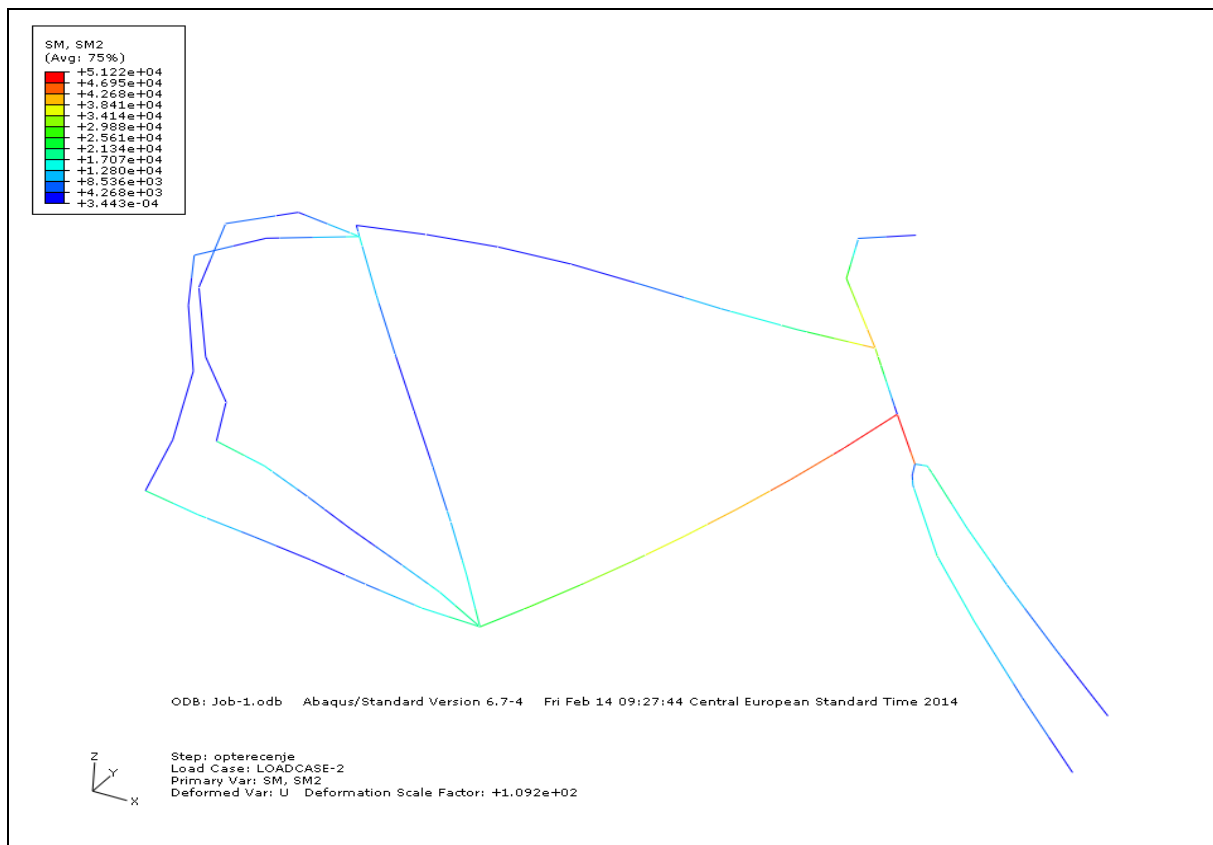


Sl. 4.7. Smična naprezanja od druge skupine opterećenja ($L2$)

Na slici 4.8 i 4.9 su prikazani momenti savijanja koji su izraženi u lokalnim kordinatnim sustavima.

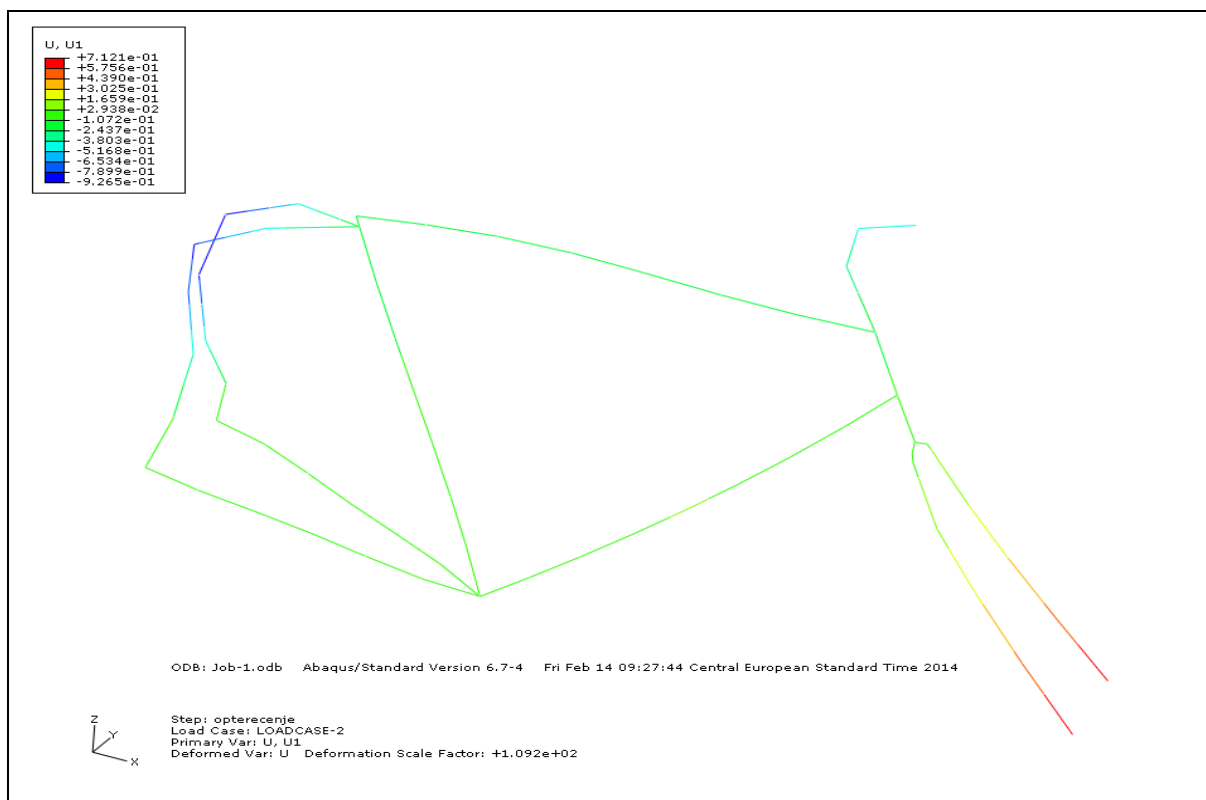


Sl. 4.8. Momenti savijanja od druge skupine opterećenja ($L2$), izraženi oko lokalnih osi 1

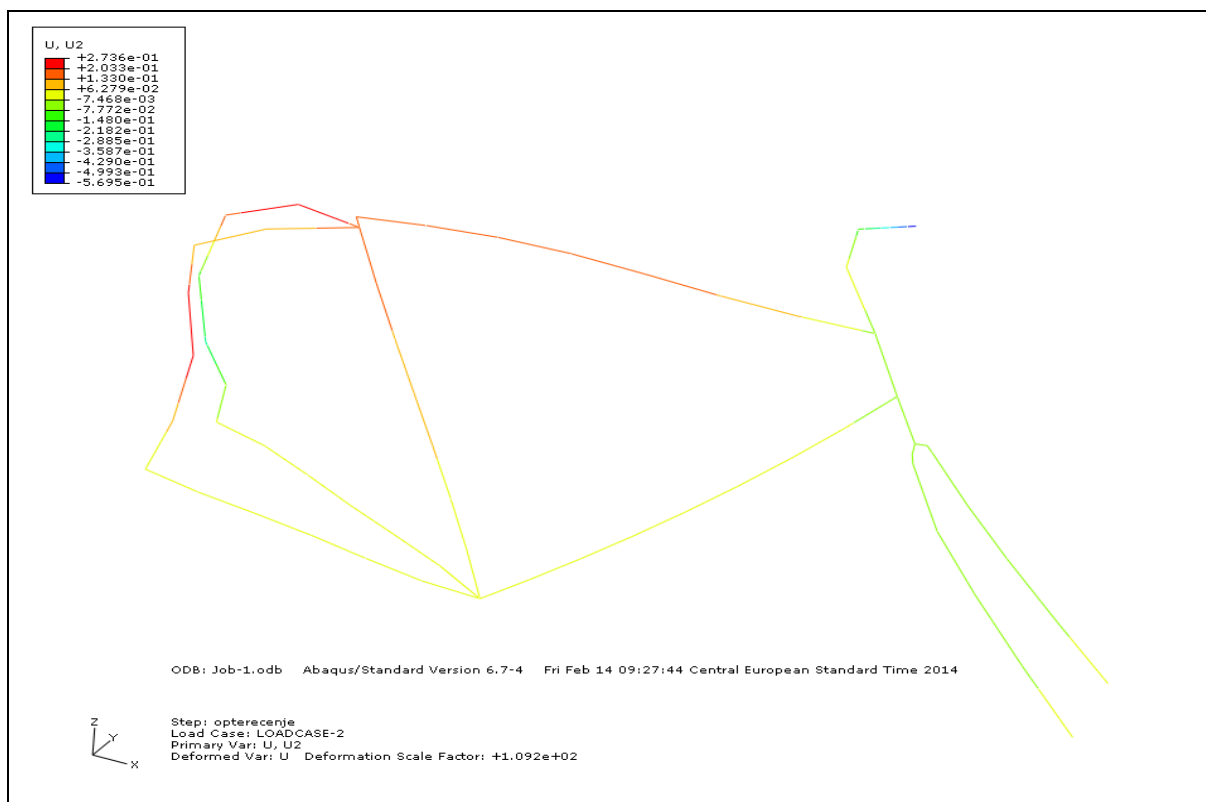


Sl. 4.9. Momenti savijanja od druge skupine opterećenja ($L2$), izraženi oko lokalnih osi 2

Na slici 4.10 i 4.11 su prikazani pomaci konstrukcije biciklističkog okvira u globalnom kordinatnom sustavu.



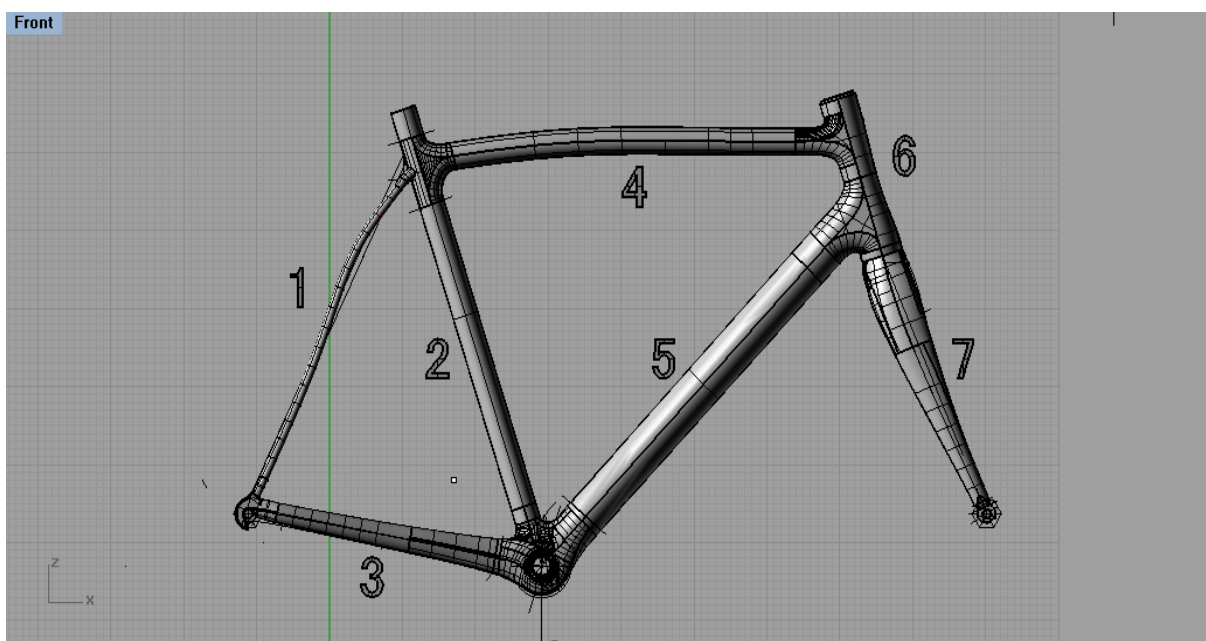
Sl. 4.10. Pomaci konstrukcije od druge skupine opterećenja ($L2$), izraženi u smjeru osi x



Sl. 4.11. Pomaci konstrukcije od druge skupine opterećenja ($L2$), izraženi u smjeru osi y

4.3. Teorijsko određivanje strukture i mase biciklističkog okvira

Struktura biciklističkog okvira je podijeljena na sedam dijelova, s ciljem lakšeg određivanja potrebnih količina materijala, prikaz podjele biciklističkog okvira je na slici 4.12. Teorijski podaci i mase pojedinih dijelova, koje će se odrediti ovdje, će biti korištene za određivanje mase ugljičnog ojačala, koji će biti korišten u proizvodnji. Plan je da određeni dijelovi biciklističkog okvira budu proizvedeni kao monocoque tj. iz jednog dijela. A pomoćne cijevi lanca i sjedala biti će kalupljene posebno, te kasnije spojene s okvirom s pomoću epoksidnog ljepila.



Sl. 4.12. Podjela dijelova biciklističkog okvira

Površina pojedinih dijelova biciklističkog okvira se odredila s pomoću formule: $P=2r\pi l$, gdje je r - radijus cijevi, l – duljina cijevi. U tablici 4.1 su navedene površine pojedinih cijevi, te je uz pomoć debljine stijenke t određen volumen materijala V na pojedinim dijelovima okvira. Debljina stijenke je određena metodom konačnih elemenata, što je objašnjeno u poglavlju 4.2.

Tablica 4.1. Geometrijske karakteristike dijelova biciklističkog okvira

Oznaka cijevi	r	l	P	t	V
	cm	cm	cm ²	cm	cm ³
1	0,6	50	377	0,1	37,7
2	1,7	52	555,4	0,1	55,5
3	1,7	40	854,6	0,12	102,5
4	1,75	53	582,7	0,1	58,2
5	2,7	65	1102,7	0,12	132,3
6	2,6	19	310,4	0,1	31
7	1,6	62	972,7	0,12	116,7

Množenjem dobivenih volumena stijenke cijevi s gustoćom materijala, dobivene su teorijske mase pojedinih dijelova biciklističkog okvira, što je prikazano u tablici 4.2. Vrijednost gustoće polimernog kompozita s ugljičnim vlaknima je određena prema literaturi Filetin T.: Svojstva i primjena materijala, te gustoća iznosi 1,6 g/cm³ za kompozit s volumnim udjelom ojačala od 0,6.

Tablica 4.2. Mase pojedinih dijelova biciklističkog okvira

Oznaka cijevi	m	$m\text{-ojačala}$	$m\text{-smole}$
	g	g	g
1	60,3	36,2	24,1
2	88,8	53,3	35,5
3	164	98,4	65,6
4	93	55,8	37,2
5	211,6	126,9	84,6
6	49,6	29,7	19,8
7	186,7	112	74,6
Σ	854	512,3	341,5

Ukupna masa biciklističkog okvira iznosi oko 854 grama, no tu masu se preporuča uvećati za 10%, jer je moguće da će u radijusima biti potrebno koristiti veću količinu materijala, te uvećana masa iznosi 939,4 g.

Teorijski podaci su korišteni s ciljem da se teorijski dobivena masa materijala na pojedinim dijelovima usporedi s praktično dostupnim oblikom i masom ugljičnih ojačala. Npr. za dio bicikla broj 3 je utvrđeno da je teorijska masa ojačala i smole 164 grama, taj se iznos podijelio s brojem slojeva (8) i s površinom sloja (854 cm^2), te se dobila jedinična težina od $0,024 \text{ g/cm}^2$, što odgovara tržišno dostupnoj masi prepreg ojačala od 200 g/m^2 .

4.4. Proizvodna struktura biciklističkog okvira

U suradnji s poduzećem Motoplastika d.o.o. definirana je potrebna masa, površina i broj slojeva ojačala (pletivo $0^\circ, 90^\circ$) koje je potrebno koristiti pri proizvodnji dijelova biciklističkog okvira u autoklavu, te postupkom injekcijskog prešanja, podaci su prikazani u tablicama 4.3 i 4.4. U poglavlju 6 će se odrediti troškovi materijala koji je ovdje definiran.

Tablica 4.3. Dimenzije, površina i broj slojeva ugljik-epoksi ojačala (200 g/m^2) pri proizvodnji u autoklavu

Dio okvira	Dimenzija ojačala	Površina ojačala	Broj slojeva	Površina slojeva
	cm*cm	cm^2		cm^2
1	1,2*50	377	7	2639
2	3,4*52	555,4	7	3887,8
3	3,4*40	854,6	8	6836,8
4	3,5*53	582,7	7	4079
5	5,4*65	1102,7	8	8821,6
6	5,2*19	310,4	7	2173
7	3,2*62	972,7	8	7782
Σ				36218
+10%				39839

Preporuča se dodati zbroju površine ojačala dodatak od 10%, jer je moguće da će u radijusima biti potrebno upotrijebiti veću količinu ojačala. Potrebna površina prepreg ojačala od 200 g/m^2 je oko $3,98 \text{ m}^2$.

Tablica 4.4. Dimenzije, površina i broj slojeva ugljičnog ojačala (200 g/m^2) pri proizvodnji RTM postupkom

Dio okvira	Dimenzija ojačala	Površina ojačala	Broj slojeva	Površina slojeva
	cm*cm	cm ²		cm ²
1	1,2*50	377	5	1885
2	3,4*52	555,4	5	2777
3	3,4*40	854,6	6	5128
4	3,5*53	582,7	5	2913,5
5	5,4*65	1102,7	6	6612,2
6	5,2*19	310,4	5	1552
7	3,2*62	972,7	6	5836,2
Σ				26707
+10%				29377,8

U proizvodnji RTM postupkom potrebna površina ojačala od 200 g/m^2 je oko $2,93 \text{ m}^2$. Masa te površine ojačala je 586,2 grama, a udio smole je 0,4 te je potrebna količina epoksidne smole u proizvodnji 234,5 grama.

Struktura ojačala će se prikazati za jedan dio biciklističkog okvira, npr. za dio 5 se predlažu strukture ojačala prikazane u tablicama 4.5 i 4.6.

Tablica 4.5. Primjer strukture prepreg ojačala za dio 5 okvira, pri proizvodnji u autoklavu

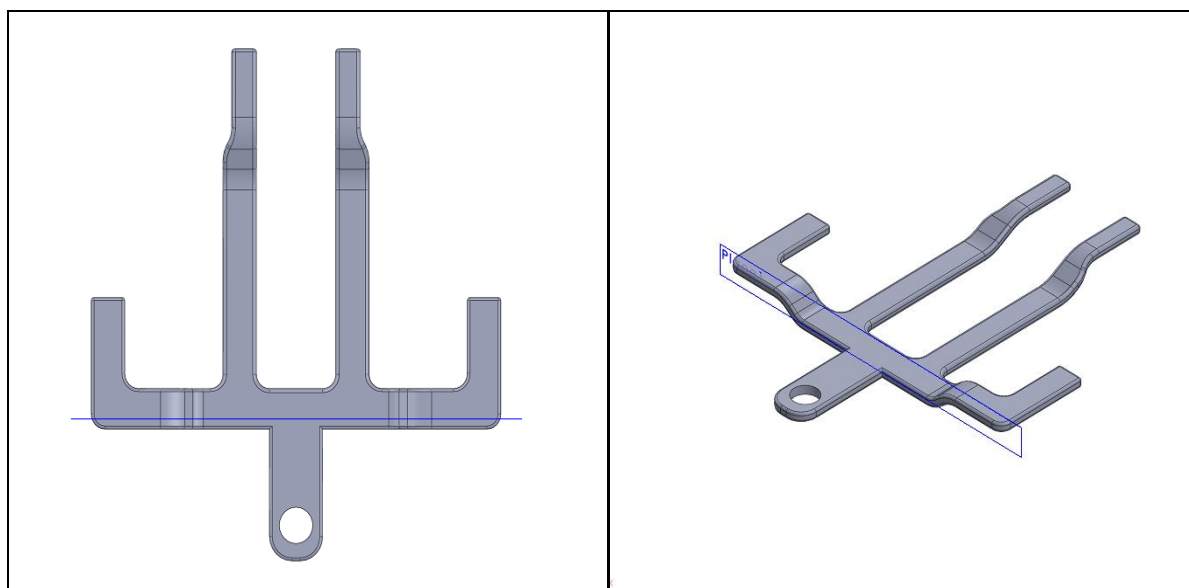
Masa ojačala	Tip ojačala	Broj slojeva	Kut ojačala	Dimenzije sloja
g			°	cm
200	Plain 0,90	1	45	5,4*65
200	Plain 0,90	1	-45	5,4*65
200	Plain 0,90	1	90	5,4*65
200	Plain 0,90	1	0	5,4*65
200	Plain 0,90	1	0	5,4*65
200	Plain 0,90	1	90	5,4*65
200	Plain 0,90	1	-45	5,4*65
200	Plain 0,90	1	45	5,4*65

Tablica 4.6. Primjer strukture ojačala za dio 5 okvira, pri proizvodnji RTM postupkom

Masa ojačala	Tip ojačala	Broj slojeva	Kut ojačala	Dimenzije sloja
g			°	cm
200	Plain 0,90	1	45	5,4*65
200	Plain 0,90	1	-45	5,4*65
200	Plain 0,90	1	0	5,4*65
200	Plain 0,90	1	0	5,4*65
200	Plain 0,90	1	-45	5,4*65
200	Plain 0,90	1	45	5,4*65

4.5. Mogućnosti upotrebe sendvič kompozita u proizvodnji biciklističkih dijelova

U ovom poglavlju će se prezentirati prednosti upotrebe sendvič kompozita u odnosu na obični laminat. U proizvodnji biciklističkih dijelova sendvič kompozite je pogodno koristiti za izradu biciklističkih upravljača. U proizvodnji triatlonskih biciklističkih upravljača preporuča se koristiti sendvič kompozite. Na slici 4.13 prikazana je konstrukcija biciklističkog upravljača.



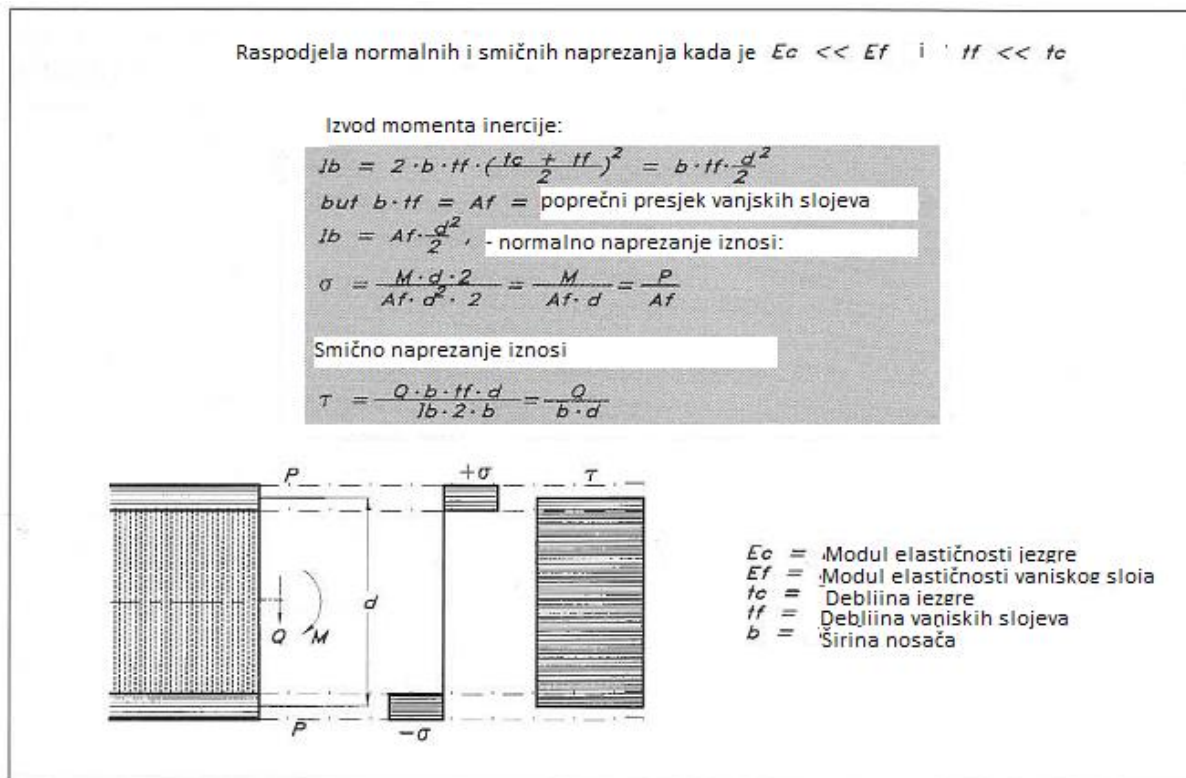
Sl. 4.13. Prikaz biciklističkog upravljača

Sendvič konstrukcije se sastoje od dva kruta sloja laminata između kojih se nalazi porozna jezgra te se postiže visoka čvrstoća i krutost uz relativno nisku masu. U ovom primjeru vanjski slojevi će biti od polimernih kompozita, a jezgra od polimerne pjene ili sača aramida, ovisno o proračunatim naprezanjima. Vanjski slojevi su obično izrađeni od materijala više čvrstoće i krutosti, oni nose opterećenje u smjeru ravnine ali također i poprečna naprezanja uslijed savijanja. Konstrukcijski gledano jezgra ima dvije funkcije, ona razdvaja površinske slojeve te se suprotstavlja deformiranju u smjeru okomitom na ravninu, također ona u određenoj mjeri osigurava krutost u ravninama okomitima na površinski sloj, te mora imati zadovoljavajuću smičnu krutost i tlačnu čvrstoću. Smična krutost sprječava pojavu klizanja vanjskih slojeva. Također smična krutost jezgre omogućuje da vanjski slojevi funkcioniraju skupno pri opterećenju, odnosno normalna vlačna i tlačna naprezanja su raspoređena na gornji i donji vanjski sloj sendvič kompozita.

Prednost sendvič konstrukcija u usporedbi s običnim laminatima je činjenica da se povećanjem debljine poprečnog presjeka može povećati čvrstoća i krutost, bez povećanja mase. Kritično naprezanje koje sendvič može podnijeti je proporcionalno modulu elastičnosti i momentu inercije poprečnog presjeka, a obrnuto proporcionalno je kvadratu duljine ispitnog uzorka. Ukoliko se se želi povećati krutost sendvič kompozita, jedna mogućnost je da se koriste materijali s višim modulom elastičnosti što povećava troškove, a druga mogućnost je da se poveća poprečni presjek i moment inercije. Moment inercije je proporcionalan dimenziji poprečnog presjeka uvećanoj za treću potenciju, te povećanjem poprečnog presjeka dolazi do značajnog rasta krutosti.

Vanjski slojevi nose vlačna i tlačna naprezanja. Lokalna savojna krutost vanjskih slojeva je vrlo mala, pa ju se u formulama zanemaruje, te se sendvič laminati oblikuju kao cjelina s ciljem da bi mogli prihvatiti savojna opterećenja. Za održanje funkcioniranja vanjskih slojeva i jezgre kao cjeline, ključnu ulogu ima vezivo između vanjskih slojeva i jezgre. Vezivo mora moći prenijeti posmične sile između jezgre i slojeva. Smična krutost veziva mora moći prihvatiti ista posmična naprezanja kao i materijal jezgre.

Na slici 4.14 prikazana su naprezanja uslijed savijanja sendvič nosača, biciklistički upravljač je obično opterećen na savijanje. Indeks f se odnosi na vanjske slojeve, a indeks c na jezgru. Pretpostavlja se da vanjski slojevi preuzimaju normalna naprezanja, a jezgra preuzima smična naprezanja. U ovom primjeru se zanemaruje moment inercije vanjskih slojeva, te je rezultirajući moment $I_b = A_f \cdot d^2 / 2$. Moment inercije je proporcionalno ovisan o debljini vanjskih slojeva i kvadratu debljine sendviča.



Sl. 4.14. Naprezanja u sendvič nosaču [10]

Pod tim pretpostavkama normalno naprezanje u vanjskim slojevima iznosi $\sigma = M/A_f \cdot d$, te sposobnost prihvatanja opterećenja ovisi o površini vanjskih slojeva.

- Dimenzije biciklističkog upravljača su sljedeće:
debljina jezgre $t_c = 10$ mm, debljina vanjskih slojeva $t_f = 2$ mm, $d = 12$ mm, $b = 40$ mm.
- Procijenjeni moment savijanja koji djeluje na biciklistički upravljač iznosi:
 $M = 200\,000$ Nmm.

Normalna naprezanja vanjskih slojeva:

$$\sigma = \frac{M}{A_f \times d} = \frac{200000 \text{ Nmm}}{80 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}} = 208,34 \text{ N/mm}^2$$

-zaključuje se da vanjski slojevi će biti izloženi navedenom naprezanju, navedeno naprezanje treba biti uvećano za sigurnosni faktor, te čvrstoća materijala koji će se koristiti u konstrukciji treba biti oko 400 N/mm^2 , navedena čvrstoća se postiže u kompozitu s ugljičnim vlaknima i epoksidnom smolom.

U ovom slučaju se pretpostavlja da jezgra (promatrana kao zasebni dio) ne doprinosi fleksijskoj krutosti sendviča, s obzirom na njenu nisku fleksijsku krutost. Također se može pretpostaviti da je smično naprezanje konstantno. Smično naprezanje je obrnuto proporcionalno dimenziji poprečnog presjeka jezgre. Ove aproksimacije daju ukupnu grešku od 2 do 3% kada je debljina jezgre minimalno 5,77 puta deblja od vanjskih slojeva, te kada je modul elastičnosti vanjskih slojeva znatno veći od modula elastičnosti jezgre.

- Smična naprezanja jezgre iznose:

$$\tau = \frac{Q}{b \times d} = \frac{1000\text{N}}{40\text{mm} \times 12\text{mm}} = 2,08\text{N/mm}^2$$

- Zaključuje se da će jezgra biti izložena navedenom smičnom naprezanju, navedeno naprezanje treba biti uvećano za sigurnosni faktor, te smična čvrstoća materijala koji će se koristiti u konstrukciji treba biti oko 4 N/mm^2 , navedena smična čvrstoća se postiže u kompozitu odabirom PVC jezgre veće jedinične mase.

Proizvod je moguće izraditi proizvodnjom u autoklavu i RTM postupkom. Ukoliko će se upravljač proizvoditi RTM postupkom, prvo treba izraditi kalup, pa umetnuti ojačala u kalup, te raditi s tekućom smolom. Prednost proizvodnje u autoklavu je jednostavnija priprema slojeva.

Ukupna površina sendvič strukture je $P=560 \text{ cm}^2$, te je potrebno 2 puta po 13 slojeva da se dobije debljina vanjskih slojeva od 2 mm. Ukupna površina ojačala potrebnog za proizvodnju sendvič strukture $P= 14560 \text{ cm}^2 = 1,45 \text{ m}^2$.

U suradnji s poduzećem Motoplastika zaključeno se da se navedeni iznos može povećati na 2 m^2 , jer u proizvodnji nije moguće iskoristiti cjelokupnu površinu prepreg slojeva, nego ima i otpadnog materijala. Trošak materijala za proizvodnju biciklističkog upravljača od sendvič kompozita iznosi:

- 2 m^2 prepreg ojačala od $200 \text{ g/m}^2 = 500 \text{ kg}$
- $0,5 \text{ m}^2$ PVC jezgre = 50 kg

S ciljem analize prednosti upotrebe sendvič kompozita u proizvodnji usporediti će se potrebna količina materijala i troškovi materijala za proizvodnju biciklističkog upravljača od sendvič kompozita te od ugljik-epoksi kompozitnog laminata kružnog poprečnog presjeka. U slučaju kružnog poprečnog presjeka biciklističkog upravljača moment inercije iznosi:

$$I_y = \pi \frac{(Dv^4 - Du^4)}{64} = \pi \frac{(30^4 - 27^4)}{64} = 13673,7 \text{ mm}^4$$

Normalna naprezanja vanjskih slojeva iznose:

$$\sigma = \frac{M}{I_y} z = \frac{200000}{13673,7} 15 = 219,4 \text{ N/mm}^2$$

gdje je:

Dv – vanjski promjer biciklističkog upravljača,

Du – unutarnji promjer biciklističkog upravljača,

M – moment savijanja biciklističkog upravljača,

z – udaljenost vanjskih slojeva od neutralne osi pri savijanju.

Potrebna debljina stijenke cijevi biciklističkog upravljača iznosi $t = 3 \text{ mm}$. Površina cijevi biciklističkog upravljača iznosi $P = 1318 \text{ cm}^2$, taj se iznos pomnoži s potrebnim brojem slojeva ugljičnog preprega od 200 g/m^2 , broj slojeva iznosi 20, te se dobije ukupna površina potrebnog preprega za proizvodnju, koja iznosi: $P = 26376 \text{ cm}^2 = 2,63 \text{ m}^2$. Navedeni iznos se može povećati na 3 m^2 , jer u proizvodnji ima i otpadnog materijala. Trošak materijala za proizvodnju biciklističkog upravljača od kompozitog laminata iznosi:

- 3 m^2 prepeg ojačala od $200 \text{ g/m}^2 = 750 \text{ kn}$.

Zaključak je da se upotrebom sendvič kompozita umjesto kompozitnog laminata može smanjiti količina potrebnog materijala i trošak materijala.

5. Postupci proizvodnje kompozitnih tvorevina

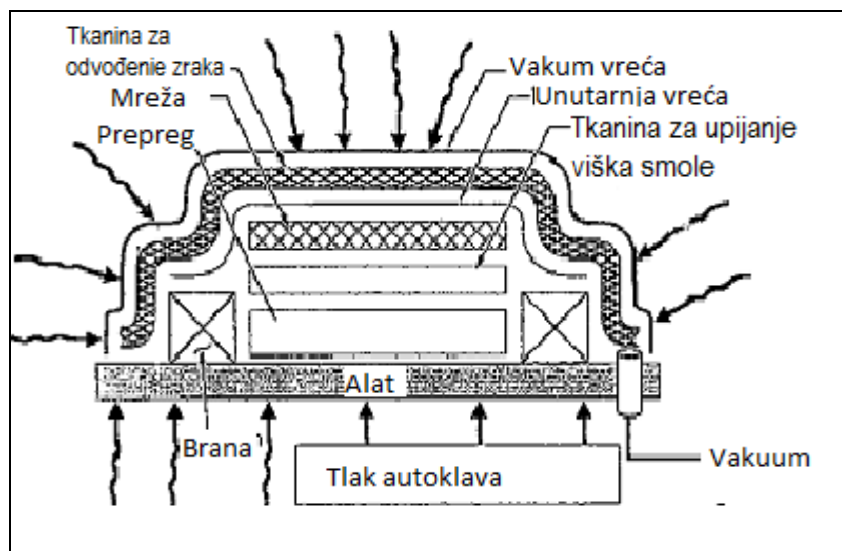
U ovom radu će se analizirati proizvodnja u autoklavu, kojom se postiže visoka kvaliteta proizvoda i dobra mehanička svojstva; te RTM postupak, koji ima raširenu primjenu zbog mogućnosti velikoserijske proizvodnje, dobrih svojstava dobivenog proizvoda, te niskih troškova proizvodnje. Proizvodnja u autoklavu se sastoji od slaganja prepreg materijala na predoblik kalupa, a RTM postupak se sastoji od postavljanja predoblika ojačala u kalupnu šupljinu, te ubrizgavanja smole pod tlakom.

5.1. Proizvodnja u autoklavu

Upotreba autoklava pri proizvodnji kompozita je ključni dio proizvodnog procesa, jer tada dolazi do umreživanja smole, što značajno utječe na kvalitetu proizvoda. Tijekom proizvodnje u autoklavu događa se nekoliko međuzavisnih procesa u kompozitu kao što je prijenos topline, tok smole, promjena viskoznosti smole, kemijsko povezivanje molekula i stvaranje poroznosti. Mnogo čimbenika utječe na kvalitetno umreživanje smole, te nije jednostavno postići visokokvalitetni kompozitni proizvod bez poroznosti. U znanstvenoj literaturi postoje brojni modeli koji objašnjavaju fenomene koji se događaju pri proizvodnji kompozita. Istraživanja su omogućila kvalitetno planiranje pojedinih faza proizvodnje u autoklavima.

Proizvodni postupci koji prethode autoklavu su proizvodnja preprega, rezanje, lijepljenje, ručno i automatsko slaganje, te pakovanje za autoklav. Iako troškovi proizvodnje u autoklavu nisu najznačajniji udio u krajnjoj cijeni proizvoda, to je ipak kritični korak u proizvodnji jer kvaliteta proizvoda ovisi o procesima koji se događaju u autoklavu.

Tipična struktura slojeva pri proizvodnji u autoklavu je prikazana na slici 5.1.



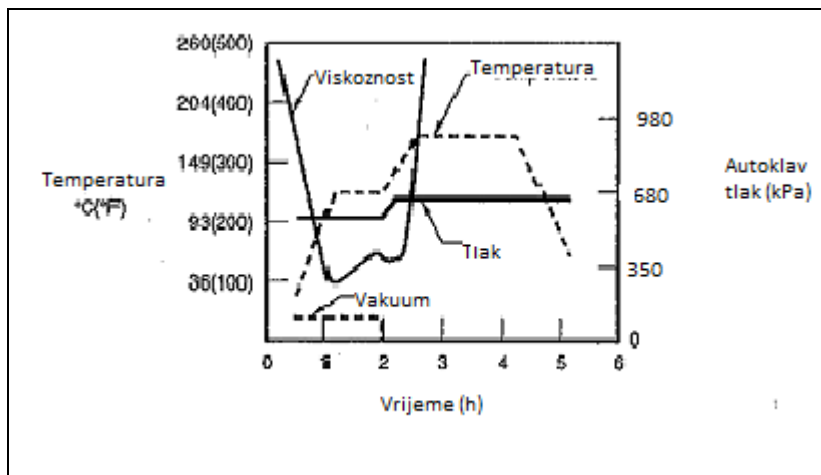
Sl. 5.1. Tipično proizvodno pakovanje u autoklavu [5]

Laminat preprega je posložen na alat ili kalup. Na rub laminata su postavljene pregrade koje reguliraju vodoravni tok smole pri proizvodnji. Na vrh laminata se postavlja odjeljivački sloj tkanine koja omogućuje lakše odvajanje proizvoda i pomoćnih tkanina. Laminati koji se proizvode tečenjem smole, na njih se obavezno postavlja tkanina za upijanje viška smole, koja omogućuje odvođenje viška smole. Na prethodne slojeve se postavlja ploča, koja osigurava kvalitetniju površinu i podjednako raspodjeljuje tlak autoklava, zatim se postavlja unutarnja vreća koja je pričvršćena za alat ili pregrade, te se na taj način kontrolira okomiti tok smole. Potom slijedi tkanina za odvođenje zraka i vakuum vreća, koja omogućuje podtlak ispod vakuuma vreće.

5.1.1. Proizvodni ciklus

Tipični proizvodni ciklus kompozitnih tvorevina na osnovi epoksidne smole je prikazan na slici 5.2, sastoji se od dva zagrijavanja i dva razdoblja izotermičkog temperiranja. Prvo zagrijavanje i temperiranje omogućuju tečenje smole u alatu ili kalupu te isparavanje nepoželjnih plinova. Primjenjeni tlak iznosi obično oko 588 kPa, uz podtlak ispod vakuumske vreće. Krivulja promjene viskoznosti prikazuje pad viskoznosti smole, što je uzrokovano zagrijavanjem smole i tečenjem. Drugo zagrijavanje i temperiranje omogućuje polimerizaciju, tijekom te faze viskoznost naglo raste i dolazi do povezivanja molekula smole. Tijekom te faze je tlak povećan na 680 kPa, a vakuum je otpušten. Ta druga faza je kritična s obzirom na

stvaranje poroznosti, jer visoka temperatura pogoduje hlapljenju plinova otopljenih u smoli, a tlak smole je niži što pogoduje isparavanju plinova.



Sl. 5.2. Proizvodni ciklus u autoklavu [5]

Postizanjem potrebne izotermne temperature umreživanja, unutar proizvoda teče ujednačeno umreživanje. U autoklavu se postižu izotermni uvjeti uslijed ujednačenog temperiranja kalupa, koje se odvija uz prirast temperature od 1,5 °C po minuti.

Poznavanje ponašanja viskoznosti smole pri proizvodnji je ključni čimbenik kvalitetnog proizvoda. Postoje tipovi prepreg smole koji imaju više tečenje pri proizvodnji te su osjetljiviji na pripremu proizvoda u autoklavu, dok drugi tip smole koji ima niže tečenje je postojaniji na pogreške tijekom pripreme poluproizvoda. S povišenjem kompleksnosti proizvoda prevladala je upotreba prepreg slojeva s niskim tečenjem smole. Na taj način je omogućen pravilan omjer smole i vlakana, s udjelom vlakana od oko 60 %, što osigurava dobra mehanička svojstva. Željeni udio smole se kreće između 31 % za jednosmjerna vlakna i 35 % za pletena vlakna. Također je poboljšana kontrola oblika, smanjena je potreba za pripremu prepreg slojeva i smanjeno je pomicanje vlakana tijekom proizvodnje.

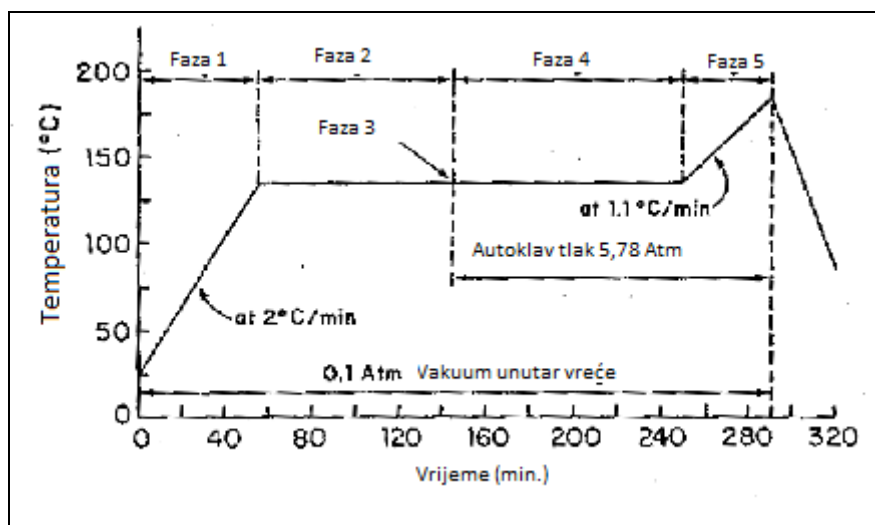
Tijekom proizvodnje je kritično ako dođe do ulaska zraka u slojeve proizvoda, jer to uzrokuje poroznost i niža mehanička svojstva. Drugi problem pri proizvodnji kompozitnih tvorevina je odvođenje topline, jer egzotermna reakcija smole oslobađa toplinu, te je kod većih debljina proizvoda potrebno planirati odvođenje topline, da se spriječi toplinska degradacija proizvoda.

Za optimizaciju i nadzor procesa proizvodnje potrebni su kontrolni sustavi i osjetila za nadzor procesa umreživanja smole. Osjetila omogućavaju on-line nadzor proizvodnog procesa, s pomoću njih je moguće utvrditi pojedine faze proizvodnog ciklusa. Sustav za upravljanje proizvodnim ciklusom sastoji se od osjetila, on-line procesnog modela i baze podataka. Postoje razvijeni kontrolni sustavi za upravljanje proizvodnjom u autoklavu.

5.1.2. Primjer proizvodnje laminata

Proizvodnja u autoklavima se najčešće koristi za proizvodnju visokokvalitetnih strukturnih laminata u zrakoplovnoj industriji. U proizvodnji prvo se slažu prepreg slojevi na kalup s određenom orijentacijom vlakana ojačala, posloženi prepreg slojevi se oblažu tkaninom za upijanje viška smole tkaninom, kao primjerice Mylar tkaninom, a završni sloj je vakuumska vreća.

Na slici 5.3 je prikazan redoslijed temperiranja i profil tlaka pri proizvodnji laminata $(0, +45, -45, 90)_{2S}$, koji se sastoji od T300 Thornel vlakana, te Narmco 5208 epoksidne smole. Narmco 5208 smola se koristi u zrakoplovnoj industriji, bazirana je na TGMDA epoksidu. Na dijagramu se uočava da nakon što se povisi temperatura, dolazi do pada viskoznosti, tečenja smole, te iniciranja kemijskih reakcija. Između 93 i 135 °C viskoznost je minimalna, a zatim dolazi do porasta viskoznosti uslijed umreživanja. Pri temperaturi od 135 °C počinje djelovanje tlaka s ciljem konsolidacije laminata.



Sl. 5.3. Proizvodni ciklus pri proizvodnji kompozita T300/Narmco 5208, $(0, +45, -45, 90)_{2S}$ [5]

5.1.3. Modeliranje svojstava matrice

Kinetički modeli definiraju minimalno vrijeme potrebno za umreživanje matrice, s pomoću njih se može odrediti oslobođenu toplinu reakcije umreživanja, koja se koristi u modelu prijenosa topline; također je moguće odrediti stupanj umreživanja, koji se koristi u modelima koji objašnjavaju viskoznost smole. Egzotermna transformacija epoksi smole u polimer može biti izražena na slijedeći način:



Gdje je k - konstanta brzine reakcije, H – oslobođena toplina.

Kinetički modeli su obično izvedeni na temelju eksperimentalnog mjerenja oslobađanja topline kao funkcije vremena i temperature pri proizvodnji kompozitnih tvorevina.

Za većinu komercijalno dostupnih smola postoje kinetički i viskozni modeli, s pomoću kojih se može planirati proizvodni proces u autoklavu na temelju promjene viskoznosti smole. S pomoću tih modela se određuju vremena temperiranja, koja omogućuju tečenje smole, umreživanje i izbjegavanje nepovoljnih procesa kao što je postizanje poroznosti.

Visoki tlak se primjenjuje da bi se ostvarilo kompaktiranje slojeva vlakana i spriječilo postizanje poroznosti proizvoda. Nužno je tlak autoklava prenijeti na smolu, a to ovisi o sadržaju vlakana, konfiguraciji proizvoda i količini tkanine za upijanje viška smole. Nužno je prepoznati značenje tlaka smole, jer se s pomoću tlaka spriječava postizanje poroznosti u proizvodu. U početku proizvodnje u autoklavu tlak smole je jednak tlaku autoklava no kada krene tečenje smole dolazi do pada tlaka smole, a taj je period kritičan s obzirom na postizanje poroznosti.

U proizvodnji se nastoji modelirati tok smole i raspodjelu tlaka, što nije jednostavno s obzirom na varijacije u proizvodnji. S pomoću tih modela moguće je predvidjeti tok smole kroz porozni medij, ti modeli uzimaju u obzir mnoge varijable kao što je temperatura i tlak smole, vrsta i raspodjela slojeva ojačala. Najvažniji rezultat modela toka smole je raspodjela tlaka smole, koji mora spriječiti hlapljenje plinova iz smole, te postizanje poroznosti.

Modeli toplinskog toka su najjednostavniji modeli procesa u autoklavu. S pomoću tih modela nastoji se opisati utjecaj temperiranja, toka smole i umreživanja na toplinski tok. Posebice je važno povezivanje kinetičkog modela smole i toplinskog toka, jer se na taj način spriječava pregrijavanje debljih dijelova kompozita.

5.1.4. Postupci kontrole umreživanja i proizvodnje kompozita u autoklavu

Za optimizaciju i nadzor procesa proizvodnje potrebni su kontrolni sustavi i osjetila za nadzor procesa umreživanja smole. Osjetila omogućuju on-line nadzor proizvodnog procesa, s pomoću njih je moguće utvrditi pojedine faze proizvodnog ciklusa. Sustav za upravljanje proizvodnim ciklusom sastoji se od osjetila, on-line procesnog modela i baze podataka. Postoje razvijeni kontrolni sustavi za upravljanje proizvodnjom u autoklavu.

S porastom upotrebe polimernih materijala postoji potreba razvoja jeftinih automatiziranih proizvodnih postupaka, s ciljem proizvodnje proizvoda identičnih svojstava i kvalitete. Za razvijanje pouzdanih automatiziranih, inteligentnih proizvodnih postupaka potrebno je motriti i mjeriti promjene stanja smole pri proizvodnji. Mnogi čimbenici u proizvodnji su promjenjivi, primjerice svojstva smole, svojstva provodnosti topline, također postoje razlike u autoklavima i operacijama proizvodnje. Inteligentnim nadzorom proizvodnje moguće je na vrijeme uočiti probleme u proizvodnji, te promjenom procesnih parametara korigirati proizvodni ciklus i dobiti kvalitetan proizvod.

U praksi je potrebno eksperimentalno provjeriti kinetičke modele, koje se provodi mjerenjem stupnja umreživanja smole ovisno o temperaturi i vremenu. Ta istraživanja se mogu vršiti na makroskopskoj i mikroskopskoj razini, motrenjem kemijskih, fizikalnih, mehaničkih i toplinskih svojstava smole pri umreživanju. Najviše korišteni postupci istraživanja su sljedeći:

- Kalorimetrija (DSC) je postupak makroskopskog opisa proizvodnje kompozitnih tvorevina, analizira se sveukupno kinetičko ponašanje smole. DSC je najviše korišteni postupak za utvrđivanje stupnja umreživanja, te za utvrđivanje oslobađanja topline pri proizvodnji kompozitnih tvorevina. Taj postupak se temelji na mjerenju diferencijalnog napona, potrebnog da se uspostavi toplinska ravnoteža između uzorka (smole) i mjernog uređaja. Rezultat je u obliku termograma, na osnovu kojih se može utvrditi iznos entalpije u specifičnoj fazi umreživanja, te podjelom tog iznosa s ukupnom entalpijom reakcije odredi se stupanj umreživanja.
- Spektroskopija je postupak koji analizira mikroskopsku razinu umreživanja smole, mjeri koncentraciju pojedinih komponenata pri umreživanju. Taj postupak se sastoji od odašiljanja radijacije kroz ispitni uzorak, te se izoliraju frekvencije koje padaju na detektor. Analizom se ustanove spektri energije, koji se identificiranjem pridružuju određenim kemijskim spojevima. Rezultat su dijagrami udjela pojedinih funkcionalnih skupina, kao što je epoksid, amin, hidroksid i sl.

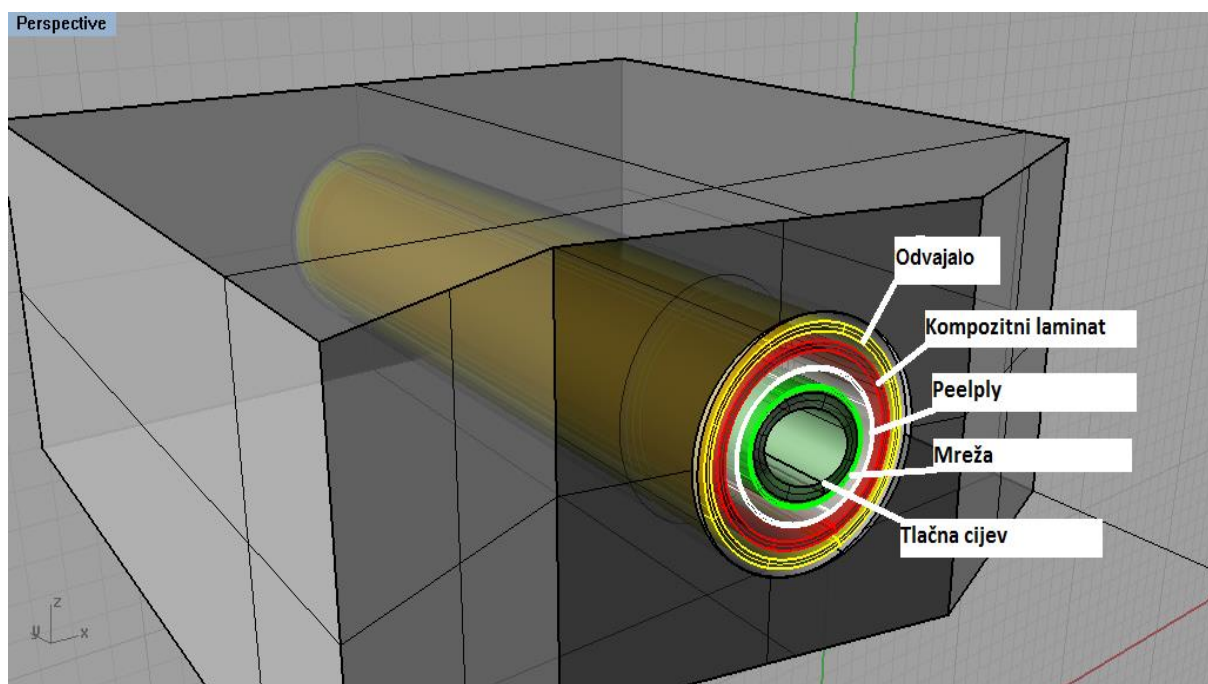
- Frekvencijsko dielektrično mjerenje umreživanja (FDEMS) omogućava pouzdano, automatizirano mjerenje promjena makroskopskih karakteristika smole u proizvodnji. Taj postupak omogućava mjerenje kemijskih i fizikalnih promjena u cijelom ciklusu umreživanja smole. Mjerenja je moguće provoditi do temperatura od 400 °C, i pri tlakovima od 60 bara, a točnost metode iznosi 0,1 %. Moguće je mjeriti početak umreživanja, promjene viskoznosti i stupanj umreživanja, rezultat je povećanje pouzdanosti, kvalitete i smanjenje vremena planiranja proizvodnje. FDEMS postupak je vrlo često osnovni input u on-line inteligentno upravljani proizvodni ciklus. Princip funkcioniranja FDEMS postupka je mjerenje promjene mobilnosti iona u prisustvu električnog polja. Varijacije mobilnosti molekula uzrokovane električnim poljem omogućuju pouzdano mjerenje promjena stanja smole.

5.1.5. Definicija kalupa i materijala korištenih u proizvodnji biciklističkih dijelova postupkom u autoklavu

Oblik kalupa za proizvodnju biciklističkih dijelova postupkom u autoklavu se definirao u suradnji s poduzećem Motoplastika d.o.o. Kalup se sastoji od dva dijela, te klasičnih dodataka kao što su naprave za centriranje, kanali za odvođenje viška smole i sl. Na slici 5.4 je prikazan shematski presjek kalupa i istaknut je slijed slojeva u proizvodnji. U proizvodnji je cilj da određeni dijelovi biciklističkog okvira budu proizvedeni kao monocoque tj. iz jednog dijela. A pomoćne cijevi lanca i sjedala biti će kalupljene posebno, te kasnije spojene s okvirom pomoću epoksidnog ljepila.

U proizvodnji cijevi koristiti će se tehnologija, s pomoću koje se slažu slojevi preprega oko zračne sintetičke cijevi (inflatable latex bladder), na taj način se mogu kvalitetno posložiti ojačala i spriječiti pomicanje ojačala tijekom napuhavanja zračne cijevi, te je postignuta veća preciznost strukture prepreg slojeva. Prije proizvodnje posloženi prepregi sa zračnim cijevima će se pažljivo postaviti u dvodijelni ženski čelični kalup, zatim se kalup postavlja u grijanu peć ili autoklav za provođenje polimerizacije.

U ovom radu se neće analizirati troškovi izrade kalupa, jer to obuhvaća tehnologiju obrade metala. Prema preporuci poduzeća Motoplastika d.o.o. trošak izrade kalupa će se procijeniti, te će trošak biti naveden na kraju tehnoekonomske analize.



Sl. 5.4. Presjek dijela kalupa za proizvodnju biciklističkih dijelova postupkom u autoklavu

U proizvodnji će se koristiti prepreg ojačalo od 200 g/m^2 , s kutem vlakana pod $0^\circ, 90^\circ$. Prepreg je armatura od ugljičnih vlakana koja je prethodno impregnirana epoksidnom smolom. Najveća prednost upotrebe preprega je njihova jednostavnost rukovanja u proizvodnji. Na primjer, pri proizvodnji nije potrebno korištenje tekuće smole u zatvorenom ili otvorenom kalupu, niti pripremanje tkanine i epoksidne smole. Epoksi prepreg dolazi namotan na roli i ima željeni omjer smole i vlakana.

Na gotovi proizvod će se nanositi gelcoat, zaštitno dekorativni sloj laminata, koji kompozitu daje odgovarajući sjaj i boju, također gelcoat štiti proizvod od atmosferskih utjecaja. Koristit će se gelcoat na bazi epoksidne smole, koji imaju dobru elastičnost i otpornost prema apsorpciji vode, te dobru postojanost na UV zračenje.

Odvajalo služi za sprečavanje ljepljenja kompozitnog laminata za kalup, te se osigurava jednostavno vađenje proizvoda iz kalupa, bez oštećenja. Postoje jednokratna odvajala, kao što su voskovi, sapuni i silikoni, koji odvajaju proizvod zbog izostanka kohezivnih sila. Prilikom vađenja iz kalupa ta se odvajala troše, te nisu preporučljivi za upotrebu jer je kompliciranija obrada proizvoda i potrebno je više utrošenog vremena i troškova naknadne obrade. Najnovija generacija odvajala za kalupe bazira se na polimernim materijalima, koji se na površini kalupa suše u obliku nemasnog filma. Upotrebom tih odvajala skraćuje se vrijeme pripreme kalupa.

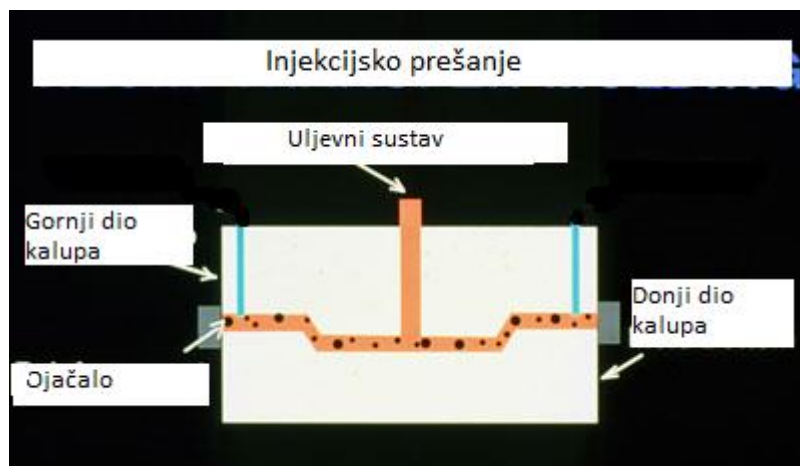
Na tržištu postoje različiti proizvodi gelcoata i odvajala, te u ovom radu se neće analizirati osobine pojedinih tržišnih proizvoda.

Od ostalih dijelova u kalupu preporučljivo je koristiti mrežu, koja omogućuje ravnomjerno odvođenje viška smole, te osigurava ravnomjernu raspodjelu tlaka u proizvodnji.

Peelply je glatka čvrsto tkana tkanina, koja može biti poliesterska ili poliamidna, te ima utkane crvene niti koje služe za lakše odvajanje vanjskih slojeva od kompozitnog laminata, također ta tkanina upija viškove smole iz prepreg laminata. Vakuumska vreća je nepropusna najlonska folija koja služi za odvođenje zraka iz prepreg slojeva te za kompaktiranje slojeva. U proizvodnji se također koriste ljepila za povezivanje slojeva preprega pri slaganju u kalup, kemijska struktura tih ljepila ne utječe na proces umreživanja smole.

5.2. Injekcijsko prešanje smola (resin transfer molding)

Injekcijsko prešanje smola (RTM postupak) se koristi za proizvodnju različitih proizvoda, primjerice moguće je u velikim serijama proizvoditi krovove autobusa i kamiona, a također se uspješno proizvode jarboli u brodogradnji. Ukoliko bi se RTM postupak koristio za proizvodnju dijelova biciklističkog okvira, trebalo bi umetnuti unutarnju jezgru u dijelove cijevi pri pripremi kalupa. Na slici 5.5 je prikazana shema RTM postupka i kalupa.

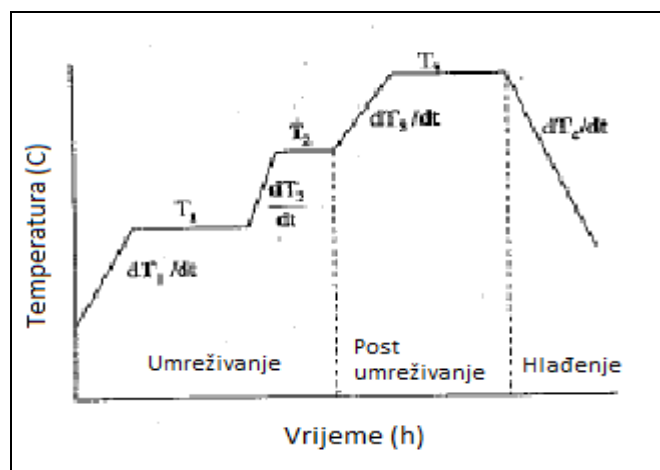


Sl. 5.5. Shema RTM postupka [11]

RTM postupak karakterizira korištenje kalupa s uloženim suhim vlaknima ojačala. Proces proizvodnje se može podijeliti u nekoliko koraka; prvi korak je predoblikovanje ojačala, koja se polažu u kalup; zatim slijedi ubrizgavanje smole da bi se vlakana ojačala u potpunosti impregnirala; završni korak je provođenje zagrijavanja što rezultira umreživanjem smole, te se nakon što proizvod dovoljno očvrstne vrši izbacivanje iz kalupa.

Na slici 5.6 je prikazan proizvodni ciklus RTM postupkom, koji se sastoji od umreživanja, post umreživanja, i hlađenja. Svaki dio ciklusa se sastoji od perioda zagrijavanja i perioda temperiranja u određenim vremenskim intervalima. Proizvodnju je potrebno planirati s ciljem smanjenja vremena proizvodnje i postizanja kvalitetnog umreživanja. Pri proizvodnji RTM postupkom analizira se odnos vremena umreživanja i temperaturnih gradijenata, jer ako se koristi višu temperaturu brži je ciklus proizvodnje, ali visoke razlike temperature između pojedinih faza proizvodnje mogu uzrokovati zaostala naprezanja, te dovesti do delaminacije kompozita. U RTM postupku proizvodni ciklus ovisi o geometriji proizvoda, toplinskoj anizotropiji, kinetici taljevine i toplinskim rubnim uvjetima.

Pri proizvodnji RTM postupkom brzina zagrijavanja kalupa je 5 – 10 °C/min te je teže ostvariti izotermalne toplinske uvjete. U RTM postupku proizvodnje potrebno je planirati optimalne toplinske uvjete s ciljem jednakog umreživanja površinskih i unutarnjih dijelova proizvoda. Pri proizvodnji proizvoda s većim debljinama stijenke potrebno je hladiti kalup nakon procesa umreživanja.



Sl. 5.6. Proizvodni ciklus u RTM postupku [5]

5.2.1. Predoblikovanje vlakana ojačala

Predoblikovanje vlakana ojačala se vrši da bi se ubrzala proizvodnja i proces postavljanja vlakana, također se na taj način poboljšava kvaliteta proizvoda jer su smanjena odstupanja mehaničkih svojstava. Predoblik ojačala treba imati dovoljnu čvrstoću da može stajati samostalno u kalupu. Za očvršćivanje predoblika vlakana ojačala obično se koristi ljepilo ili prah, pri čemu treba imati na umu da veće količine praha i ljepila snizuju mehanička svojstva jer inhibiraju kvalitetno umreživanje smole. Potrebno je obratiti pozornost na ponašanje predoblika ojačala u uglovima proizvoda gdje može doći do smanjenja udjela vlakana ojačala uslijed savijanja u uglu, te je potrebno u zakrivljene dijelove i uglove umetnuti veću količinu vlakana ojačala i pažljivo planirati proces ubrizgavanja smole. Predoblikovanje se obično vrši pri povišenoj temperaturi, te je moguće postići veći udio ojačala u proizvodu. Potrebno je obratiti pozornost na postavljanje ojačala u kalup jer je često prisutan kompresijski tlak kojim djeluju vlakna ojačala na kalup, pri tome se predoblik ojačala ponaša kao nelinearna opruga, te ukoliko se predoblik s različitim debljinama ne položi pravilno, može doći do visokog pritiska na kalup.

Od metoda koje se koriste u predoblikovanju vlakana ojačala najčešća je metoda rezanja i ljepljenja pri čemu se jednostavna izrezana vlakna ili tkanine lijepe u složenije oblike. Oblikovanje uz dovođenje topline ima najveću primjenu, u postupku se koriste posebno pripremljena ojačala koja su predimpregnirana s prahom smole. Ojačala se zagrijavaju i potom polažu u hladni kalup za oblikovanje specifičnog oblika. Također se koristi i postupak pletenja, koji je pogodan za predoblike kružnih presjeka, pletiva su dostupna na tržištu u različitim promjerima.

5.2.2. Ubrizgavanje smole

Ubrizgavanje je kritični korak jer mnogi problemi u proizvodnji nastaju u toj fazi. Za predviđanje toka smole koristi se Darcy-ev zakon, koji objašnjava tok smole kroz slojeve ojačala. Prema tom zakonu stopa jednosmjernog toka smole po jedinici površine je proporcionalna gradijentu tlaka (p/L), a obrnuto proporcionalna viskoznosti smole (μ):

$$\frac{Q}{A} = \frac{K\Delta p}{\mu L} \quad (5.1.)$$

Koeficijent K je permeabilitet (propusnost) vlakana ojačala. Prema teoriji taj koeficijent ovisi samo o porama između vlakana. Kozeny-Carman jednadžba glasi:

$$K = \frac{R^2(1-V_f)^3}{4kV_f^2}, \quad (5.2.)$$

gdje je:

k – Kozeny-eva konstanta koja iznosi 0,7 za podjednako raspoređena vlakna ojačala,

V_f - udio ojačala,

R – radijus vlakna.

Permeabilitet može biti ustanovljen i eksperimentalno, za radijalni ili jednosmjerni tok. Pri eksperimentalnom ispitivanju se ispunjava kalup kvadratnog oblika, te se s pomoću slijedeće jednadžbe dobiva vrijednost permeabiliteta:

$$K = \frac{L^2}{Tf} \frac{\mu}{2} \frac{(1-Vf)}{\Delta p}, \quad (5.3.)$$

gdje je:

Tf – vrijeme ispunjavanja površine kalupa (s)

L – karakteristična duljina kalupa (m)

Vrijeme ispunjavanja kalupa ovisi o viskoznosti smole i propusnosti ojačala, obično se prilagođavaju kinetička svojstva smole s ciljem da želiranje smole vremenski nastupa tri puta kasnije nakon vremena koje je potrebno za ispunjavanje kalupa. Smole koje imaju viskoznost ispod 1 Pas su pogodne za RTM postupak. Smole više viskoznosti se također mogu ubrizgavati uz prethodno zagrijavanje, te i pri nižim temperaturama dolazi do pada viskoznosti jer viskoznost eksponencijalno ovisi o temperaturi.

Vrijeme ispunjavanja kalupa ovisi o strategiji ubrizgavanja, koje se razlikuju s obzirom na način uvođenja smole u kalup, te odvođenja zraka iz kalupne šupljine. Osnovni načini su točkasto ubrizgavanje, rubno, te periferno ubrizgavanje. Pri točkastom ubrizgavanju smola se ubrizgava u kalup obično u sredini kalupne šupljine, tok smole je radijalan, a zrak izlazi na rubovima. Rubno ubrizgavanje se izvodi na jednom rubu kalupa, tok je približno pravocrtan, a izlaz za zrak je na suprotnom rubu. Pri perifernom ubrizgavanju smola se ubrizgava duž oboda odljevka. Perifernim ubrizgavanjem se postižu najbrža vremena ispunjavanja kalupa. Pozicioniranje ulaza smole i izlaza zraka je ključno za kvalitetni proizvod, te se često pri planiranju koriste simulacijske metode. Vrijeme ispunjavanja kalupa teorijski će ovisiti isključivo o procesnim parametrima:

$$Tf = C \frac{\mu L^2 \Phi}{\Delta p K}, \quad (5.4.)$$

gdje je:

Φ - poroznost ($1-Vf$)

C – konstanta koja ovisi o obliku proizvoda, smještaju ulaza i izlaza na kalupu, a određuje se prema tablici 12.2; str. 369.; Dave, R.C., Loos A.: Processing of composites.

Vrijeme ispunjavanja kalupa se najčešće skraćuje promjenom viskoznosti smole, povišavanjem tlaka ubrizgavanja ili promjenom sastava ojačala. Pri planiranju strategije ubrizgavanja najčešće se primjenjuje smanjenje toka smole s pomoću dodavanja dodatnih ulaza smole, te promjenom distribucije smole.

Primjer upotrebe navedenog modela će se prikazati na primjeru proizvodnje biciklističkog upravljača od sendvič kompozita, definiranog u poglavlju 4.5.

- Vrijeme ispunjavanja kalupa teorijski će ovisiti isključivo o procesnim parametrima:
viskoznost smole $\mu = 0,5$ Pas
tlak ubrizgavanja $p = 0,15$ MPa
permeabilitet $K = 1 \times 10^{-9}$ m²
udio ojačala $V_f = 0,3$
duljina dijelova kalupa $l = 1,8$ m
- U slučaju jednog uljevnog ušća smole čiji je promjer 5 mm, vrijeme ispunjavanja kalupa je sljedeće:

$$T_f = C \frac{\mu L^2 \Phi}{\Delta p K} = 0,5 \frac{0,5 \times 1,8^2 \times 0,3}{0,15 \times 1} = 1,6 \text{ h}$$

- S ciljem smanjenja vremena ispunjavanja kalupa predlaže se dva uljevna ušća promjera 5 mm, te su podaci sljedeći:

$$T_f = C \frac{\mu L^2 \Phi}{\Delta p K} = 0,5 \frac{0,5 \times 0,9^2 \times 0,3}{0,15 \times 1} = 0,4 \text{ h}$$

Zaključuje se ako je cilj skratiti vrijeme ispunjavanja kalupa preporuča se koristiti više uljevnih ušća.

5.2.3. Greške pri ubrizgavanju

Ukoliko postoje područja s višim permeabilitetom u kalupu, kroz ta područja smola brže protječe te nastaju dijelovi proizvoda koji nisu impregnirani smolom. Navedeni problem se rješava planiranjem geometrije ojačala, te planiranjem strategije ubrizgavanja. Ukoliko je niski udio vlakana ojačala u kalupu dolazi do toka smole na površini ojačala, a do toga također dolazi kada je tlak stlačivanja vlakana ojačala prenizak ili kada je tlak ubrizgavanja previsok.

Pri proizvodnji sendvič kompozita može doći do pomicanja jezgre sendviča te tada smola ostvaruje veći tok na jednoj strani kompozita, taj problem se rješava izradom rupa u jezgri, čime se omogućuje ravnomjerni tok smole i izjednačavanje tlaka.

Problem pomicanja ojačala nastaje ukoliko je brzina ubrizgavanja i tlak previsok u usporedbi s frikcijskim silama između ojačala i kalupa.

Ponekad može doći do izrazite poroznosti na dijelovima istjecanja smole iz kalupa, tada se preporučuje omogućiti istjecanje smole iz kalupne šupljine duže vremena. Za izbjegavanje poroznosti preporuča se korištenje vakuuma u kalupu, otplinjavanje smole, podešavanje niskog vakuuma, spriječiti ulaz zraka u kalup na žljebovima, a istjecanje smole treba zatvoriti prije otpuštanja tlaka ubrizgavanja i potreban je visoki tlak pri umreživanju smole.

5.2.4. Umreživanje smole

Umreživanje podrazumijeva pretvorbu tekuće smole, prvo uz porast viskoznosti u želirano stanje, a zatim u umreženu strukturu polimera. Umreživanje smole mora početi nakon ubrizgavanja, uz sigurnosni faktor koji sprječava da želiranje smole započne prije završetka punjenja kalupa. U proizvodnji se teži da se koriste smole niske viskoznosti tijekom punjenja, te da imaju kratko vrijeme umreživanja, da bi se skratio proizvodni ciklus.

Pri optimizaciji umreživanja smole teži se minimiziranju vremena proizvodnje, smanjivanje zaostalih naprezanja i stvaranja poroznosti, uz održavanje kvalitete površine.

Postupak proizvodnje, koji je određen vremenom želiranja i umreživanja smole, ovisi o reaktivnosti smole. Reaktivnost smole može se promijeniti povišenjem temperature ili promjenom kemijskog sastava smole. Kinetički modeli koji definiraju reaktivnost smole različiti su za pojedine smole, te potrebno je eksperimentalnim mjerenjem razviti model za pojedinu smole ili koristiti preporuke proizvođača smole.

5.2.5. Greške pri umreživanju

Delaminacija nastaje kao posljedica unutarnjih naprezanja, događa se najčešće kod proizvoda veće debljine i geometrijski kompleksnih proizvoda, te kod smola koje imaju veće skupljanje i ukoliko se pri proizvodnji koriste veći temperaturni gradijenti. Preporuka je smanjenje temperaturnih gradijenata i produženje procesa umreživanja smole. Kod debljih proizvoda preporuča se postepeno umreživanje postupnim temperiranjem kalupa.

Kvalitetna površina se postiže korištenjem smola s niskim skupljanjem, te povećanjem temperature na onim dijelovima kalupa gdje je potrebna kvalitetna površina. Problem poroznosti se rješava otplinjavanjem smole prije ubrizgavanja te snižavanjem temperature umreživanja.

5.2.6. Modeliranje proizvodnih procesa

Pri planiranju proizvodnih ciklusa preporuča se upotreba matematičkih modela, koji objašnjavaju fenomene prijenosa topline, toka smole i kemijskih reakcija, na osnovu tih modela se može predložiti optimalni ciklus proizvodnje temeljen na znanstvenim spoznajama. Pod optimalnim proizvodnim ciklusom podrazumjeva se upotreba temperature, tlaka i vremena u proizvodnji, kojima se postižu optimalna svojstva proizvoda.

U proizvodnji kompozitnih tvorevina koriste se dvije skupine modela umreživanja, ovisno o toplinskim uvjetima. Prvi slučaj je situacija kada su rubovi kalupa temperirani prije ubrizgavanja smole, što rezultira umreživanjem smole tijekom punjenja kalupa, drugi slučaj je naknadno temperiranje kalupa nakon ubrizgavanja smole. U prvom slučaju model umreživanja se sastoji od podmodela, a to su tok smole, uključujući model viskoznosti, prijenosa topline i model kemijskih reakcija, te se model rješava simultano. U drugom slučaju je potrebno modelirati prijenos topline da bi se predvidjelo temperature i redoslijed procesa umreživanja. Objasniti će se formulacija navedenih modela s graničnim stanjima te mogućim numeričkim rješenjima modela. Predstaviti će se osnovni modeli koji se koriste pri planiranju proizvodnih ciklusa u RTM postupku.

a) Kinetički modeli

Mehanizam umreživanja duromernih smola je vrlo kompleksan, jer dolazi do složenih kemijskih reakcija. Postoji fenomenološki i mehanistički pristup objašnjavanju umreživanja smole. Fenomenološki pristup se najviše koristi, jer je jednostavniji za praktičnu primjenu, on objašnjava proces umreživanja na makroskopskoj razini. Fenomenološki modeli su poluempirijski i neobjašnjavaju umreživanje s kemijskog stajališta.

Jednadžba je sljedeća:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} = k(T)f(a), \quad (5.5.)$$

gdje je:

α – stupanj umreživanja

t – vrijeme reakcije

$f(a)$ – funkcija koja predstavlja količinu umrežene smole, koja se utvrđuje empirijski

k – konstanta, koja se dobije iz jednadžbe:

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (5.6.)$$

gdje je:

A – frekvencijski faktor,

Ea – aktivacijska energija,

R – konstanta smole,

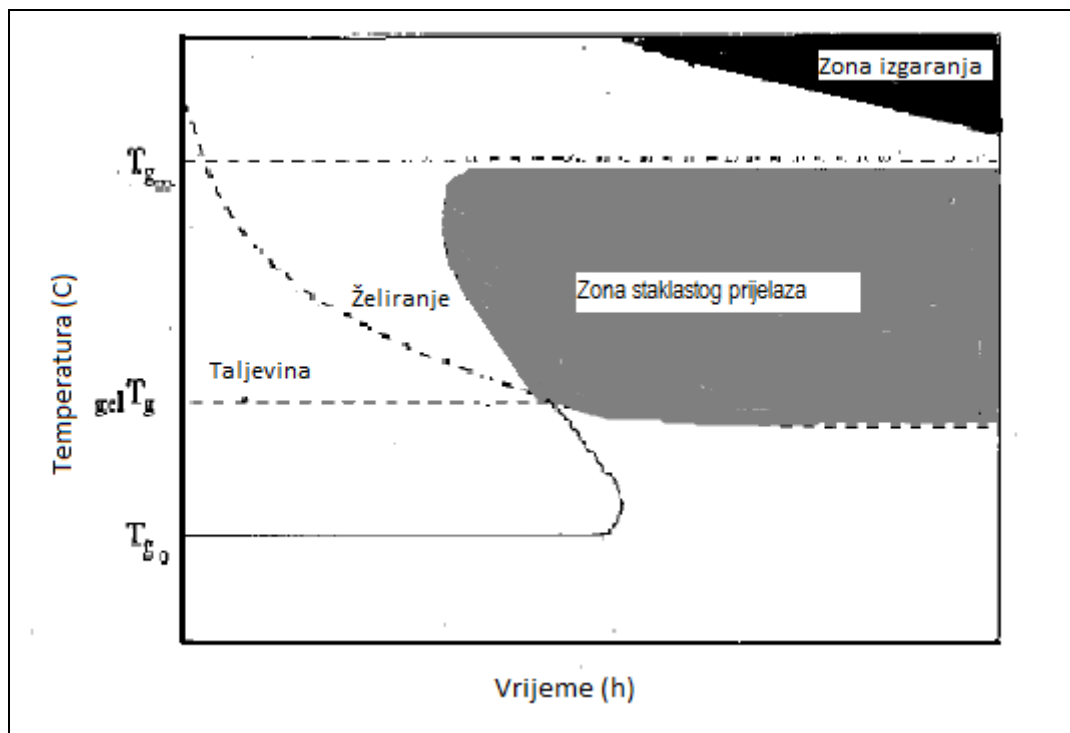
T – temperatura proizvodnje K.

S obzirom na sustav smole koji se koristi, i na temelju empirijskog praćenja proizvodnje, utvrđuje se funkcija $f(a)$ s tom funkcijom se objašnjava stupanj umreživanja. S pomoću kinetičkih modela moguće je pratiti i planirati umreživanje određenog sustava smole s ciljem dobivanja kvalitetnih mehaničkih svojstava.

b) Modeli želiranja

Pri umreživanju dolazi do kemijskih i fizikalnih promjena smole. Umreživanje uzrokuje porast molekulne mase i promjenu viskoznosti smole. U TTT (vrijeme, temperatura, pretvorba) dijagramu postoje dva kritična područja, to je želiranje i zona staklastog prijelaza. Želiranjem se tekuća smola pretvara u želiranu masu, a staklastim prijelazom, koji je

nepoželjan, dobiva se tzv. gel staklo. U dijagramu su važne tri temperature: temperatura staklastog prijelaza T_{go} , temperatura pri kojoj želiranje i staklasti prijelaz nastupaju istovremeno $gel\ T_g$, te temperatura umreživanja smole $T_{g\infty}$. Na slici 5.7 je prikazano da je smola potpuno umrežena ako je temperatura umreživanja viša od $T_{g\infty}$, te je potrebno izbjeći staklasti prijelaz (vitrification).



Sl. 5.7. TTT – dijagram umreživanja [5]

Također temperatura umreživanja nesmiye ostati previsoka dulji period jer dolazi do degradacije smole. Početak želiranja je od kritične važnosti u proizvodnji kompozitnih tvorevina, razvijeni su modeli koji predviđaju stupanj umreživanja do faze želiranja (α_g).

$$\alpha_g = \frac{1}{(r + rs(f - 2))^{1/2}} \quad (5.7.)$$

gdje je:

f – funkcionalnost umreživajućih grupa ($f=4$ za aminske skupine),

r – molni omjer grupa spojeva u reakciji ($r=1$, za epoksidnu smolu i aminiški hidrogen)

s – udio aminskog hidrogena u sustavu ($s=1$).

Pri proizvodnji epoksidne smole vrijednosti su obično $f=4$, $r=1$, $s=1$, te se dobije $\alpha_g=0,577$. Dakle kada je postignut taj stupanj umreživanja smole, tada mobilnost molekula je znatno smanjena te daljnje umreživanje smole potrebno je opisati difuzijskim efektima, koji trebaju biti upotrijebljeni u kinetičkim modelima.

c) Reološki modeli

Viskoznost smole pri procesu umreživanja je funkcija vremena, temperature, te stupnja umreživanja. Reološko ponašanje smole je sljedeće: prvo dolazi do sniženja viskoznosti zbog porasta temperature, kao posljedica porasta mobilnosti spojeva u reakciji, nakon toga dolazi do povišenja viskoznosti zbog umreživanja i rasta molekula. Reološki modeli pri proizvodnji polimera obično se objašnjavaju prilagođavanjem određenih funkcija eksperimentalnim podacima. Bilježe se promjene viskoznosti ovisno o promjeni temperature, te se uz određene konstante ustanovi funkcija odnosa između temperature i viskoznosti.

d) Modeliranje toka smole

U literaturi postoji više modela toka smole za RTM postupak, tok smole se obično opisuje na makroskopskoj razini, te se za opisivanje toka koristi Darcyev zakon, tok smole se modelira s obzirom na permeabilitet ojačala, geometriju kalupa, te ostale procesne parametre. Darcyev

zakon glasi :

$$u = -\frac{1}{\eta_{eff}} K \nabla P \quad (5.8.)$$

gdje je:

η_{eff} - efektivna viskoznost

u – prosiječni volumni vektor brzine smole

K – tenzor permeabiliteta,

P – prosiječni volumni gradijent tlaka.

Efektivna viskoznost varira u kalupu s obzirom na ovisnost o temperaturi i stupnju umreživanja. Upotrebom metode konačnih volumena se odredi distribucija tlaka u kalupu, te je moguće predvidjeti tok smole. Kada se utvrdi distribucija tlaka smole, s pomoću numeričkih metoda se odredi brzina punjenja kalupa.

e) Metode rješavanja modela

Navedene jednadžbe se rješavaju numeričkim metodama, kao što su metode konačnih volumena. S pomoću tih metoda se generira računalna mreža diferencijalnih elemenata koja predstavlja geometriju proizvoda. Moguće je modelirati različite mreže konačnih volumena s pomoću kojih se modelira kompleksna geometrija proizvoda, s određenim graničnim stanjima. Pripisivanje procesnih parametara pojedinim diferencijalnim elementima je jednostavno, te je moguće modelirati složene proizvodne uvjete.

Suvremeni simulacijski programi u proizvodnji kompozitnih tvorevina pružaju informacije o stupnju umreživanja, vremenu punjenja kalupa, mogućnosti pojave zaostalih naprezanja, te je moguće optimirati proizvodni ciklus.

S obzirom na kompleksnost procesa umreživanja, postoje nepoznati parametri koji se nemogu predvidjeti modeliranjem, te se oni predviđaju uvrštavanjem u modele konstanti koje su procijenjene analiziranjem eksperimentalnih podataka. Upotreba navedenih modela je ograničena s obzirom na vrstu smole i proizvodnog postupka.

f) Utjecaj ojačala na kinetičke modele

Svojstva vlakana ojačala mogu utjecati na kinetiku i reologiju smole, te na ponašanje pri proizvodnji. U proizvodnji kompozitnih tvorevina s ojačalom od ugljičnih vlakana dolazi do poboljšane vodljivosti topline, jer ta vlakna imaju veću toplinsku vodljivost od staklenih vlakana. Utvrđeno je pri proizvodnji s vinilesterom i E-staklom da može doći do usporavanja indukcijskog vremena potrebnog za inicijalni početak umreživanja, zbog djelovanja E-stakla koje usporava toplinski tok.

U proizvodnji je potrebno utvrditi na koji način sredstva kojima se tretiraju ojačala utječu na umreživanje smole. Utvrđeno je da određena sredstva produžuju vrijeme umreživanja smole.

U proizvodnji duromernih smola kriste se anorganska punila, kojima je cilj smanjiti troškove proizvodnje i skupljanje smole, ta punila također imaju svrhu odvođenja topline s ciljem postizanja bolje kontrole temperature pri umreživanju. Dodatci ne utječu na proces umreživanja, ali mogu djelovati kao toplinski vodiči, ako imaju višu toplinsku vodljivost od smole i ojačala.

Istiće se da je potrebno prilagoditi kinetičke i reološke modele smole uvjetima koji nastaju pri proizvodnji kompozita.

5.2.7. Proizvodnja kalupa

Proizvodnja kalupa može biti podijeljena na direktnu, indirektnu ili hibridnu izradu. U direktnom postupku šupljina kalupa se izrađuje glodanjem iz bloka materijala, koji je odabran za kalup. U indirektnom postupku koristi se predmodel, na koji se laminiraju budući dijelovi kalupa. U proizvodnji je potrebno integrirati dizajniranje proizvoda i kalupa. Pri konstruiranju proizvoda potrebno je izbjegavati oštre radijuse, jer to dovodi do problema pri eksploataciji kalupa i dolazi do povećanih naprezanja u dijelovima radijusa. Preporuča se da radijusi budu tri puta veći od debljine laminata na mjestu radijusa.

Veliki odljevci se proizvode s malim udjelom vlakana, jer se kalupi proizvode od kompozita da bi se snizili troškovi, te potrebno je da kalupi budu lagani i da se primjenjuju manje sile zatvaranja kalupa. U RTM postupku se koriste kalupi s debljinama od 1 mm do 50 mm.

Materijali za kalupe se razlikuju s obzirom na gustoću, toplinski kapacitet i čvrstoću, te je pri konstruiranju kalupa potrebno analizirati utjecaje navedenih faktora. Ostali faktori su cijena materijala kalupa, trajnost, maksimalna temperatura koju materijal može podnijeti.

Tolerancije proizvoda su u velikoj mjeri određene svojstvima kalupa, tu se posebno misli na čvrstoću kalupa. U RTM postupku dolazi do velikih sila ubrizgavanja, primjerice tlak ubrizgavanja od 4 bar će proizvesti silu od 800 kN na kalup površine 2 m^2 , te sile moraju biti prihvaćene kalupom i alatima koji zatvaraju kalup. Proračunskim metodama je potrebno odrediti čvrstoću kalupa.

Preporuča se da žljebovi kalupa budu u jednoj ravnini jer je na taj način lakše provesti brtvljenje. Kvaliteta potrebna pri zatvaranju kalupa i brtvenih površina ovisi o temperaturi pri kojoj se odvija proces i vrsti smole. Kao žljebovi kalupa se obično koriste silikonske gume. Sustav zatvaranja kalupa u maloserijskoj proizvodnji se sastoji od običnih vijaka, a u velikoserijskoj proizvodnji obično se koristi hidraulično otvaranje i zatvaranje kalupa.

5.2.8. Definicija kalupa i materijala korištenih u proizvodnji biciklističkih dijelova RTM postupkom

U proizvodnji će se koristiti ugljično roving ojačalo od 200 g/m², s kutem vlakana od 0°,90°. Materijali ojačala sastoje se od ugljičnih vlakana, koja su pletena u tkanine kojima se lako rukuje tijekom proizvodnje. Ugljična vlakna su visokokvalitetna ojačala koja se primjenjuju u suvremenim kompozitima. Ta vlakna imaju najviši specifični modul i najvišu specifičnu čvrstoću, koju zadržavaju pri povišenim temperaturama. Ugljična vlakna obično su prevučena zaštitnim epoksidnim slojem koji poboljšava vezanje s polimernom matricom.

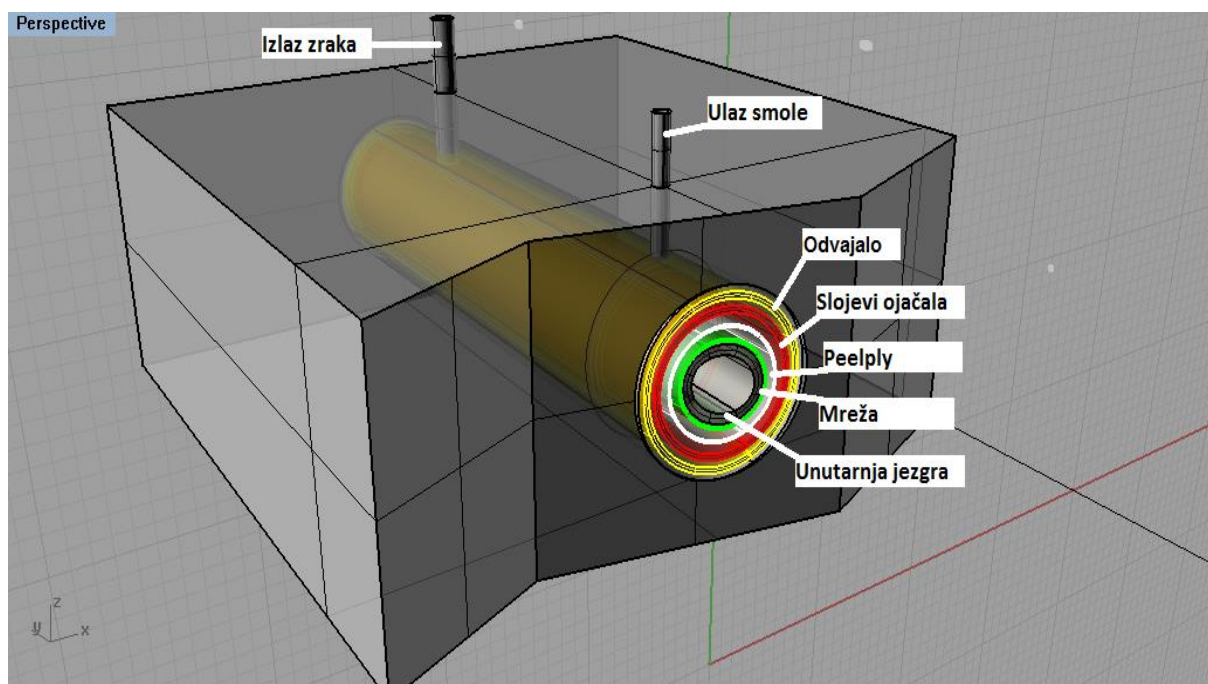
Epoksidna smola odlikuje se niskom razinom skupljanja, odličnom adhezijom i mehaničkim svojstvima, te kemijskom postojanošću.

Na tržištu postoje različiti proizvodi ojačala i epoksi smola, te u ovom radu se neće analizirati osobine pojedinih tržišnih proizvoda.

Na gotovi proizvod će se nanositi gelcoat, zaštitno dekorativni sloj laminata, koji kompozitu daje odgovarajući sjaj i boju, također gelcoat štiti proizvod od atmosferskih utjecaja. Koristit će se gelcoat na bazi epoksidne smole, koji imaju dobru elastičnost i otpornost prema apsorpciji vode, te dobru postojanost na UV zračenje.

Odvajalo služi za sprečavanje ljepljenja kompozitnog laminata za kalup, te se osigurava jednostavno vađenje proizvoda iz kalupa, bez oštećenja. Preporuča se upotreba najnovije generacije odvajala za kalupe, koja se bazira na polimernim materijalima, te se upotrebom ovih odvajala smanjuje vrijeme pripreme kalupa.

Od ostalih dijelova u kalupu preporučljivo je koristiti mrežu, te vakumsku vreću ako je potrebno odvođenje zraka iz slojeva ojačala te kompaktiranje slojeva prije ubrizgavanja smole. U proizvodnji se također koriste ljepila za povezivanje slojeva ojačala pri slaganju u kalup, kemijska struktura tih ljepila ne utječe na proces umreživanja smole. Na sl 5.8 je prikazan shematski presjek kalupa i istaknut je slijed slojeva u proizvodnji.



Sl. 5.8. Presjek dijela kalupa za proizvodnju biciklističkih dijelova RTM postupkom

6. Određivanje troškova proizvodnje

Troškovi se mogu definirati kao resursi koje treba žrtvovati ili kojih se treba odreći radi postizanja specifičnog cilja. Upravljanje troškovima (Cost Management) može se definirati kao postizanje menadžerskih ciljeva na temelju optimalnog angažiranja troškova [12]. Upravljanje troškovima poseban je način vođenja poslovanja koji najveću važnost u postizanju organizacijskih ciljeva poklanja optimalizaciji troškova.

Upravljanje troškovima razumijeva predviđanje, planiranje, budžetiranje i kontrolu troškova te analize koje pokazuju ponašanje troškova ovisno o promjeni okolnosti i uzroke odstupanja od predviđenih troškova s ciljem njihovog zadržavanja u prihvatljivim granicama te osiguravanje informacija menadžerima za izbor između mogućih alternativa koje omogućavaju promjene smjerova aktivnosti radi postizanja optimalnih ekonomskih rezultata. Temeljni cilj upravljanja troškovima je postići što veću dugoročnu korist od ostvarenog troška ili postići određeni menadžerski cilj uz što niže troškove bez dugoročnih negativnih posljedica na rezultat poslovanja. Svaki se trošak isplati ako donosi veću dugoročnu korist od vrijednosti žrtvovanih resursa.

Proizvodni troškovi se dijele na primarne troškove proizvodnje i troškove proizvodne režije. Primarni troškovi proizvodnje sastoje se od troškova koji nastaju kao izravna posljedica aktivnosti proizvodnog centra. To su troškovi materijala neposredno utrošenog u proizvodnji, troškovi proizvodnog rada i drugi specifični troškovi neposredno vezani za proizvodnju.

Troškovi proizvodne režije su troškovi koji su posljedica pratećih aktivnosti vezanih za proizvodnju ili troškovi koji se ne mogu izravno povezati s određenim proizvodom ili uslugom. Primarni troškovi su u pravilu izravni (direktni) troškovi, a troškovi proizvodne režije su neizravni (indirektni) troškovi.

6.1. Pravila upravljanja troškovima

U današnjem poslovnom svijetu životni vijek proizvoda je sve kraći, pa i ciklus povrata na angažirani kapital mora biti kraći. Zbog toga poduzeća moraju napuštati manje profitabilne proizvode i manje profitabilne dijelove poduzeća. Stvarni troškovi, prihodi i profit za svaki segment proizvodnje moraju uvijek biti poznati.

Troškovi poslovanja u relativnoj svoti moraju kontinuirano padati. Stalno smanjenje troškova poslovanja u relativnoj svoti može biti rezultat smanjenog rasipanja, povećanja proizvodnosti, optimalnog odnosa između rasta kapaciteta i njihova korištenja, te naročito sposobnosti brzog prestrukturiranja kapaciteta.

Razlog zbog kojih poduzeća prekoračuju prihvatljive troškove je taj što obično ne znaju pravu strukturu svojih stvarnih troškova kao ni mjesta ni prave razloge njihova prekoračenja. Najčešća pogreška koja se javlja u operacijama s troškovima je rad s prosječnim troškovima i profitima kao da su jednako raspoređeni na centre odgovornosti, proizvode, usluge i kupce. Bez pravog poznavanja troškova i profita, kad profit počne padati ili nestane, menadžeri često provode restrikciju troškova u krivom smjeru i na krivim mjestima. Spoznaje o troškovima i profitabilnosti po centrima odgovornosti i proizvodima pomažu menadžerima da zadrže velike dijelove općih režijskih troškova u prihvatljivim granicama.

6.2. Modeli upravljanja troškovima

Modeli upravljanja troškovima razvijaju se razvojem menadžmenta i njegovih funkcija te razvojem računovodstvenih sustava i znanstvenih metoda izučavanja troškova. Osnovni modeli upravljanja troškovima su:

1. Model tradicionalnog upravljanja proizvodnim troškovima (Traditional Product Costing – TPC)

Model tradicionalnog upravljanja proizvodnim troškovima je najstariji model, a temelji se na podjeli troškova na tri glavne grupe:

- a) troškovi izravnog materijala
- b) troškovi izravnog rada, i
- c) troškovi proizvodne režije

U okviru tradicionalnog modela troškovi izravnog materijala i rada prate se i kontroliraju po jedinici proizvoda ili usluge, a troškovi proizvodne režije se pridružuju izravnim troškovima na temelju udjela troškova izravnog rada. Tradicionalni model upravljanja troškovima ne vodi računa o različitim troškovima aktivnosti proizvodne režije koji se javljaju kod svake vrste proizvoda ili usluga već ih prati u ukupnom iznosu.

Temeljna prednost ovog modela je jednostavnost primjene, te se on koristi kod radno intenzivnijih proizvodnji u manjim poduzećima kada se ne zahtijeva značajnija točnost u rasporedu troškova proizvodne režije.

2. Modeli upravljanja troškovima temeljeni na procesima

(Process Based Costing – PBC)

Modeli upravljanja troškovima temeljeni na procesu razvili su se u vrijeme povećanja kompleksnosti proizvodnje i prelaska na strategiju diverzifikacije proizvodnje. Oblikovani su na način da prate i vrednuju troškove proizvodnje slijedeći tok procesa proizvodnje po fazama.

Prema toj metodi troškovi materijala i rada prate se prema fazama procesa proizvodnje, a troškovi proizvodne režije dodaju se izravnim troškovima na razini svake faze uz primjenu određenih tzv. ključeva rasporeda. Primjena PBC modela pokazuje uzroke troškova proizvodne režije i stupanj njihovog pridruživanja izravnim troškovima svake faze u procesu proizvodnje. Oni su usmjereni prvenstveno na reduciranje proizvodnih troškova i unapređenje procesa proizvodnje. Prednost PBC modela je u tome što se njime može osigurati temelj za razumijevanje obrasca ponašanja troškova i analizu vremenskog ciklusa proizvodnje.

U ovom radu se obračun troškova materijala i rada proveo prema PBC modelu.

6.3. Analiza troškova proizvodnje biciklističkog okvira postupkom u autoklavu

Analiza troškova će biti napravljena za period od godinu dana, uzet će se u obzir troškovi radnih sati i troškovi materijala.

Cijena radnih sati

Cijena radnih sati je izračunata na osnovu pretpostavljene bruto plaće radnika, za radni mjesec od 160 radnih sati. Navedeni iznos se množi s faktorom troškova energetike i amortizacije strojeva, koji iznosi 1.7, te s faktorom troškova poslovanja i razvoja poduzeća, koji iznosi 2.

$Nr_{sd} = 8h$ - broj radnih sati dnevno

$Dt = 5$ dana - broj radnih dana u tjednu

$Bp = 7000$ kn -brutto plaća radnika

$Nr_{sm} = 160h$ - broj radnih sati u mjesecu

$$CRS = 1,7 \times 2 \frac{Bp}{Nr_{sm}} = 148,7 \text{ kn/h}$$

Cijena radnog sata pri proizvodnji u autoklavu iznosi 150 kn/h.

S pomoću tablice 6.1 ustanovio se broj i cijena radnih sati za izradu biciklističkog okvira postupkom proizvodnje u autoklavu. Potreban broj radnika i utrošeni radni sati su se odredili usporedbom s sličnim projektima proizvodnje u poduzeću Motoplastika d.o.o. Analizom odnosa površine i broja radnika u procesima proizvodnje kompozita, odredio se učinak koji bi radnici trebali izvršiti u proizvodnji kompozita, te se odredilo potrebno vrijeme za pojedine faze izrade.

Tablica 6.1. Broj i cijena radnih sati za izradu dijelova biciklističkog okvira postupkom u autoklavu

Operacije proizvodnje	Broj radnika	Utrošeni radni sati	Efektivni radni sati
Priprema kalupa	2	2	4
Rezanje ojačala	2	3	6
Slaganje ojačala	2	4	8
Postavljanje vakumskog omota	2	3	6
Nadzor procesa	1	2	2
Obrada površine proizvoda	2	4	8
Spajanje dijelova	2	3	6
Ukupni broj radnih sati		21	40
Cijena radnog sata (kn)			150
Ukupni trošak radnih sati (kn)			6000

Efektivni radni sati se dobiju množenjem broja radnika i utrošenih radnih sati. Njihov broj se pomnoži s cijenom radnog sata da bi se odredio ukupni trošak radnih sati. Za izradu biciklističkog okvira proizvodnim postupkom u autoklavu potrebno je 40 efektivnih radnih sati, a ukupan trošak radnih sati iznosi 6000 kn.

Utrošeni radni sati moraju biti raspoređeni na način da potrebni periodi sušenja kompozitnog laminata što manje utječu na proizvodnost. Rasporedom radnih sati kroz radni tjedan zaključuje se da je vrijeme za izradu jednog biciklističkog okvira 21 radni sat, uzevši u obzir i periode sušenja laminata i gelcoata, te je godišnje moguće proizvesti 96 okvira.

$N_{rh} = 2016 \text{ h}$ - broj radnih sati u godini

$N_{h\text{proizvod}} = 21 \text{ h}$ - radno vrijeme potrebno za izradu jednog biciklističkog okvira

$$X = \frac{N_{rh}}{N_{h\text{proizvod}}} = 96$$

Ukupni trošak radnih sati u godini dana dobije se iz umnožka troška efektivnih radnih sati potrebnih za proizvodnju jednog biciklističkog okvira i broja proizvedenih okvira u jednoj godini.

$$C_{pg} = 6000 \cdot 96 = 576000 \text{ kn} \quad - \text{ cijena prerade godišnje.}$$

Troškovi materijala

U sljedećoj tablici izračunata je ukupna cijena materijala potrebnog za izradu jednog biciklističkog okvira.

Tablica 6.2. Cijena materijala za izradu jednog biciklističkog okvira proizvodnim postupkom u autoklavu

Materijal	Jedinica	Količina	Jedinična cijena	Ukupna cijena
			kn	kn
Prepreg 200g/ m ²	m ²	3,98	250	1000
Gelcoat	kg	1	100	100
Odvajalo	l	1	152	152
Peelply	m ²	2	26	52
Mreža	m ²	4	28,80	115,2
Vakumska vreća	m ²	4	20	80
Brtvena traka	kom	2	71,5	143
Ljepilo	kom	3	99	297
Σ				1939,2

Trošak materijala za izradu jednog biciklističkog okvira iznosi 1939,2 kn, a ukupni trošak materijala za godišnju proizvodnju iznosi 186163 kn.

6.4. Analiza troškova proizvodnje biciklističkog okvira RTM postupkom

Analiza troškova će biti napravljena za period od godinu dana, uzet će se u obzir troškovi radnih sati i troškovi materijala.

Cijena radnih sati

Cijena radnih sati je izračunata na osnovu pretpostavljene bruto plaće radnika, za radni mjesec od 160 radnih sati. Navedeni iznos se množi s faktorom troškova energetike i amortizacije strojeva, koji iznosi 1,7, te s faktorom troškova poslovanja i razvoja poduzeća, koji iznosi 2.

$N_{rsd} = 8 \text{ h}$ - broj radnih sati dnevno

$Dt = 5 \text{ dana}$ - broj radnih dana u tjednu

$Bp = 7000 \text{ kn}$ -brutto plaća radnika

$N_{rsm} = 160 \text{ h}$ - broj radnih sati u mjesecu

$$CRS = 1,7 \times 2 \frac{Bp}{N_{rsm}} = 148,7 \text{ kn/h}$$

Cijena radnog sata pri proizvodnji RTM postupkom iznosi 150 kn/h.

S pomoću tablice 6.3 ustanovio se broj i cijena radnih sati, za izradu biciklističkog okvira RTM postupkom proizvodnje. Potreban broj radnika i utrošeni radni sati su se odredili usporedbom s sličnim projektima proizvodnje u poduzeću Motoplastika d.o.o. Analizom odnosa površine i broja radnika u procesima proizvodnje kompozita, odredio se učinak koji bi radnici trebali izvršiti u proizvodnji kompozita, te se odredilo potrebno vrijeme za pojedine faze izrade.

Tablica 6.3. Broj i cijena radnih sati za izradu dijelova biciklističkog okvira RTM postupkom

Operacije proizvodnje	Broj radnika	Utrošeni radni sati	Efektivni radni sati
Priprema kalupa	2	4	8
Priprema smole	2	2	4
Rezanje ojačala	2	3	6
Slaganje ojačala	2	4	8
Nadzor procesa	2	2	4
Obrada površine proizvoda	2	4	8
Spajanje dijelova	2	3	6
Ukupni broj radnih sati		22	44
Cijena radnog sata (kn)			150
Ukupni trošak radnih sati (kn)			6600

Efektivni radni sati se dobiju množenjem broja radnika i utrošenih radnih sati. Njihov broj se pomnoži s cijenom radnog sata da bi se odredio ukupni trošak radnih sati. Za izradu biciklističkog okvira RTM postupkom potrebno je 44 efektivnih radnih sati, a ukupan trošak radnih sati iznosi 6600 kn.

Utrošeni radni sati moraju biti raspoređeni na način da potrebni periodi sušenja kompozitnog laminata što manje utječu na proizvodnost. Rasporedom radnih sati kroz radni tjedan zaključuje se da je vrijeme za izradu jednog biciklističkog okvira 22 radna sata, uzevši u obzir i periode sušenja laminata i gelcoata, te je godišnje moguće proizvesti 91 okvir.

$Nrh = 2016 \text{ h}$ - broj radnih sati u godini

$Nh_{proizvod} = 22 \text{ h}$ - radno vrijeme potrebno za izradu jednog biciklističkog okvira

$$X = \frac{Nrh}{Nh_{proizvod}} = 91$$

Ukupni trošak radnih sati u godini dana dobije se iz umnožka troška efektivnih radnih sati potrebnih za proizvodnju jednog biciklističkog okvira i broja proizvedenih okvira u jednoj godini.

$Cpg = 6600 \cdot 91 = 600600 \text{ kn}$ - cijena prerade godišnje.

Troškovi materijala

U sljedećoj tablici izračunata je ukupna cijena materijala potrebnog za izradu jednog biciklističkog okvira.

Tablica 6.4. Cijena materijala za izradu jednog biciklističkog okvira RTM postupkom proizvodnje

Materijal	Jedinica	Količina	Jedinična cijena	Ukupna cijena
			kn	kn
Ugljično ojačalo 200g/ m ²	m ²	2,93	190	570
Epoksi smola	kg	0,25	150	37,5
Gelcoat	kg	1	100	100
Obična cjev	m	5	4	20
Odvajalo	l	1	152	152
Vakumska vreća	m ²	4	20	80
Brtvena traka	kom	2	71,5	143
Ljepilo	kom	3	99	297
Σ				1399,5

Trošak materijala za izradu jednog biciklističkog okvira iznosi 1399,5 kn, a ukupni trošak materijala za godišnju proizvodnju iznosi 127354 kn.

6.5. Tehnoekonomska analiza

U tablici 6.5 provedena je usporedba analiziranih postupaka proizvodnje, s obzirom na svojstva krajnjeg proizvoda i karakteristike organizacije proizvodnje.

Tablica 6.5. Usporedba značajki proizvodnje biciklističkog okvira postupkom u autoklavu i RTM postupkom

		Autoklav	RTM postupak	Razlika (%)
Masa biciklističkog okvira	g	≈ 800	≈ 750	-6,25
Efektivni radni sati	h	40	44	10
Vrijeme izrade jednog okvira	h	21	22	4,7
Broj okvira godišnje	kom	96	91	-5,2
Godišnji trošak proizvodnje	kn	576000	600600	4,3
Godišnji trošak materijala	kn	186163	127354	-31,6
Ukupni godišnji trošak	kn	762163	727954	-4,5

Tehnoekonomskom analizom se neće analizirati performanse proizvoda jer ovdje prikazana razlika u masama biciklističkog okvira nastaje zbog razlike u masama dostupnih ojačala koja se koriste pri proizvodnji u autoklavu, te RTM postupku. Zaključak je da upotreba proizvodnog postupka u autoklavu pruža mogućnost postizanja više kvalitete proizvoda, jer pri slaganju prepreg slojeva moguće je postići veću preciznost u raspodjeli i strukturi pojedinih slojeva u kalupu. Proizvodnja u autoklavu je pouzdanija i manja je vjerojatnost nastajanja škarta.

Iznosi procijenjenih radnih sati za proizvodnju su sličnih vrijednosti u oba analizirana postupka proizvodnje, no pretpostavka je da taj iznos može varirati za -/+ 10 do 20 %, jer su podaci procijenjeni na temelju sličnih postupaka laminiranja u poduzeću Motoplastika d.o.o. Organizacijom proizvodnje u praksi bi se utvrdilo dali su ovdje navedeni radni sati za pojedine operacije proizvodnje dobro procijenjeni.

Efektivni radni sati su veći za 10 % u RTM proizvodnom postupku, jer je potrebno više rada utrošiti pri slaganju ojačala, te pripremi kalupa i smole. Vrijeme izrade jednog biciklističkog okvira je kraće u autoklav postupku, te je tim postupkom moguće postići veću efikasnost i produktivnost. Broj biciklističkih okvira koje je moguće proizvesti se povećava za 5 %, kao posljedica efikasnog provođenja procesa pripreme slojeva i kalupa u autoklav postupku.

RTM postupak ima veći godišnji trošak proizvodnje, jer je potrebno više proizvodnih operacija u pripremi slojeva i kalupa.

Najveća razlika između dvije analizirane tehnologije je godišnji trošak materijala, cijena materijala za autoklav postupak je 30 % veća od troška materijala za RTM postupak, a uzrok je viša cijena prepreg ojačala koji se koristi u autoklav proizvodnji.

Ukupni godišnji trošak za RTM postupak proizvodnje je niži 5 % u odnosu na autoklav postupak, zbog troškova prepreg ojačala. Za pokriće ukupnog godišnjeg troška proizvodnje cijena biciklističkog okvira proizvedenog postupkom u autoklavu treba biti 7939 kn, a cijena okvira proizvedenog RTM postupkom treba biti 7999 kn. U ovom radu se neće analizirati troškovi izrade kalupa, jer to obuhvaća tehnologiju obrade metala. Prema preporuci poduzeća Motoplastika d.o.o. trošak izrade kalupa će se procijeniti, te taj trošak iznosi oko 10 % godišnjeg troška proizvodnje, odnosno oko 70000 kn.

Tržišna cijena Cannondale biciklističkog okvira od polimernih kompozita u poduzeću Keindl-sport d.o.o. iznosi oko 11000 kn, te je zaključak da je ovdje utvrđena proizvodna cijena realna.

7. Zaključak

U proizvodnji biciklističkih dijelova kompoziti se koriste umjesto metalnih materijala zbog mogućnosti smanjenja mase konstrukcije, fleksibilnosti pri konstruiranju, i mogućnosti oblikovanja mehaničkih svojstava materijala usmjeravanjem slojeva ojačala.

Pri konstruiranju osnovna prednost kompozitnih tvorevina su njihova anizotropna mehanička svojstva, a omjeri anizotropije se mogu mijenjati pri proizvodnji izborom orijentacije vlakana ojačala. Ugljična vlakna mogu biti postavljena u specifičnim smjerovima, te je moguće smanjenje mase u dijelovima koji nisu znatno opterećeni, a također je moguće povišenje čvrstoće u kritično opterećenim dijelovima konstrukcije.

Prepreg kompozitni materijali postaju sve učestaliji u kompozitnoj industriji zbog njihove jednostavnosti korištenja, konzistentnih svojstva, i visoke kvalitete površine. Ukupno ponašanje kompozitnih tvorevina ovisi o svojstvima matrice i ojačala, veličini i rasporedu konstituenata, volumnom udjelu, i prirodi jakosti veze među konstituentima.

Geometrija biciklističkog okvira je određena prema dimenzijama cestovnih bicikala od poduzeća Cannondale, a debljinu stijenke na pojedinim dijelovima biciklističkog okvira se odredilo metodom konačnih elemenata, utvrđeno je maksimalno naprezanje koje iznosi 81 MPa, te je manje od vrijednosti dopuštenog naprezanja za ugljik-epoksi kompozit.

Usporedbom sendvič kompozita i kompozitnog laminata zaključeno je da se upotrebom sendvič kompozita može smanjiti količina potrebnog materijala i trošak materijala.

Usporedbom proizvodnje u autoklavu i RTM postupka zaključuje se da je proizvodnja RTM postupkom kompliciranija, potrebno je raditi s tekućom smolom i prethodno pripremati slojeve ojačala i kalupe. RTM postupak ima veći godišnji trošak proizvodnje, jer je potrebno više proizvodnih operacija u pripremi slojeva i kalupa.

Proizvodnja u autoklavu ubrzava proces pripreme slojeva ojačala, te osigurava proizvode identičnih mehaničkih svojstava. Proizvodnja u autoklavu je pouzdanija i manja je vjerojatnost nastajanja škarta, jer je pri slaganju prepreg slojeva moguće postići veću preciznost u raspodjeli i strukturi pojedinih slojeva u kalupu. Vrijeme izrade jednog biciklističkog okvira je kraće u autoklav postupku, te je tim postupkom moguće postići veću produktivnost.

8. Literatura

- 1) www.cervelo.com, (15.03.2014.)
- 2) www.compositesworld.com, (20.03.2014.)
- 3) Grozdanić, M.: Tehnologija izrade pneumatičke brodice s krutim dnom, Diplomski rad, FSB, Zagreb, 2009.
- 4) Kunej, W.: Poliesterski kompoziti, Metalmineral kemija d.o.o., Zagreb, 2006
- 5) Loss, A.,C., Dave, R.,S.: Processing of composites, Hanser Publishers, Berlin, 2000.
- 6) www.ponero-bikes.com, (18.03.2014.)
- 7) www.netcomposites.com, (20.04.2014.)
- 8) www.bacuplast-shop.de, (21.04.2014.)
- 9) www.cannondale.com, (15.03.2014.)
- 10) Larsson, L., Eliasson, R.: Principles of yacht design, Hillman, London, 2000.
- 11) www.precisioneering.com
- 12) Mencer, T.: Upravljanje troškovima, skripta, EFRI, Rijeka, 2000.
- 13) www.pinarelo.com
- 14) Filetin, T.: Suvremeni materijali i postupci, FSB, Zagreb, 2005.
- 15) Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.: Svojstva i primjena materijala, FSB, Zagreb, 2011.
- 16) Smojver, I.: Kompozitni materijali, FSB, Zagreb, 2007.
- 17) Barić, G.: Izabrane teme iz upravljanja poduzećem, FSB, Zagreb, 2012.
- 18) Kovšca-Obsieger J.: Zbirka zadataka iz čvrstoće broda, FSB, Zagreb, 2008.
- 19) Matejiček, F., Semenski, D., Vnućec, Z.: Uvod u statiku, Golden marketing, Zagreb, 1999.
- 20) Alfrević, I.: Nauka o čvrstoći 1, Tehnička knjiga, Zagreb, 1995.

Životopis

Martin Dušak rođen je 31. kolovoza 1983. u Slavonskom Brodu. Osnovnu i srednju tehničku školu završio je u Slavonskom Brodu. Zatim 2003. upisuje studij "Geografija" na Prirodoslovno matematičkom fakultetu, te diplomira s temom "Razvoj riječne luke Slavonski Brod". 2009. upisuje studij "Transportna logistika i menadžment" na Fakultetu prometnih znanosti, te magistrira s temom "Model planiranja kapaciteta lučkih skladišta". Zbog želje za daljnjim usavršavanjem 2011. upisuje studij "Industrijsko inženjerstvo" na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Aktivno se služi engleskim, a pasivno njemačkim jezikom.

Biography

Martin Dušak was born on the 31 of august 1983 in Slavonski Brod. He finished elementary school and technical high school in Slavonski Brod. Then in 2003 he started studying 'Geography' on the Faculty of Science, and graduated with the theme 'Developing of inland port Slavonski Brod'. 2009 he started studying 'Transportation Logistics and Management' at the Faculty of Transport and Traffic Sciences, and he received a master's degree with the theme 'Model of port warehouses capacity planning'. Because of the desire for further improvement, 2011 he started studying 'Industrial Engineering' at the Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb. He is fluent in english, and has some knowledge of German language.